

Arquitectura Basada en Inteligencia Artificial Distribuida para la Gerencia Integrada de Producción Industrial

César Bravo^{a,*}, José Aguilar-Castro^b, Addison Ríos^b, Joseph Aguilar-Martin^c, Francklin Rivas^d

^aHalliburton, Paseo de la Reforma 389, Piso 11, Colonia Cuauhtemoc, 06500, Ciudad de México, México

^bCEMISID, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Av. Alberto Carnevalli, Núcleo La Hechicera, 5101, Mérida, Venezuela

^cLAAS-CNRS, 7 Av. du Colonel Roche, 31077, Toulouse, France

^dUAPIT ULA, Urb. Belenzate, Avenida 1 con Calle 7, Quinta "Sonedi", 5101, Mérida, Venezuela.

Resumen

La propuesta presentada en este trabajo de investigación consiste en una arquitectura de referencia para la gestión integrada de producción, que permite el acceso a la información requerida para obtener una visión completa del estado del proceso productivo y habilita la automatización inteligente de los procesos de negocio, a partir de la definición de un mecanismo de acceso estandarizado a las fuentes de información de proceso, del desarrollo de un marco ontológico de producción y del uso de técnicas de inteligencia artificial distribuida, específicamente sistemas multi-agentes e instituciones electrónicas. Copyright © 2011 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Automatización Industrial. Agentes Inteligentes. Sistemas de Manufactura Inteligente. Sistemas basados en Conocimiento Inteligente. Control Inteligente.

1. Introducción

La producción industrial se compone de procesos grandes y complejos, los cuales para su control, requieren de una plataforma tecnológica que pueda manejar grandes volúmenes de información, incluyendo su interpretación y análisis automático para apoyar la toma de decisiones y generar una adecuada planificación de producción.

El esquema clásico de las plataformas para automatización industrial es un modelo piramidal jerárquico compuesto por diversos niveles, que van desde el nivel de control de procesos, en el cual se encuentran dispositivos de control regulatorio y adquisición de datos de proceso, pasando por los sistemas de control supervisorio, hasta llegar a los diversos sistemas de información de la empresa, que permiten

optimizar, gestionar recursos y apoyar a la toma de decisiones (Zimmermann, 1980).

Sin embargo, las estrategias de tecnología de información centralizadas tienen limitaciones para dar respuesta a las necesidades actuales de la industria, debido a los retrasos en la transmisión de información y en la toma de decisiones (derivada de los múltiples niveles que existen entre el sector de toma de decisiones y el proceso productivo), y a la poca flexibilidad que tienen estas estrategias para adaptarse ante cambios en los escenarios de producción. Es así como se empieza a tener interés en arquitecturas distribuidas que provean de mayor reactividad y flexibilidad a la plataforma de automatización ante los cambios en el proceso productivo (Chacón, *et al.*, 2005) (Chacón, E., Indriago M., 2011).

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: csarbravo@gmail.com (César Bravo),
aguilar@ula.ve (José Aguilar-Castro), ilich@ula.ve
(Addison Ríos), aguilar@laas.fr (Joseph Aguilar-Martin),
rivas@ula.ve (Francklin Rivas)

Este trabajo plantea una arquitectura de inteligencia artificial distribuida para la plataforma de automatización de una industria de producción continua, basada en el concepto de Gerencia Integrada de Producción.

El presente documento se compone de 7 secciones. En la Sección 2 se presentan los antecedentes que existen en los temas abordados en la propuesta presentada en este trabajo, en la Sección 3 se hace una revisión de los conceptos básicos de la Gestión Integrada de Producción, concepto en el que se basa la arquitectura propuesta en el presente trabajo; en la Sección 4 se hace una descripción general de la arquitectura planteada; en las secciones 5, 6 y 7 se presenta una descripción detallada de las capas que componen la arquitectura propuesta; finalmente, en la Sección 8 se presentan algunas conclusiones derivadas del trabajo desarrollado.

2. Antecedentes

La Automatización de Procesos Industriales y la Gerencia Integrada de Producción han sido objeto de estudio por la comunidad científica e industrial durante las últimas décadas.

En la década de 1970 se inició una corriente, denominada “modelado empresarial”, que intentaba describir los procesos que ocurren en una empresa y los elementos vinculados con dichos procesos. En las décadas siguientes empiezan a aparecer modelos y estándares empresariales, tales como CIMOSA (ENV, 1990), para representación de procesos de manufactura, el modelo ISO/OSI (Zimmermann, 1980), PERA (Williams, 1989), para modelar la infraestructura de automatización industrial, y más recientemente han aparecido modelos holónicos como PROSA (Wyns, 1999).

Las arquitecturas de automatización industrial implantadas en empresas de producción continua siguen el patrón jerárquico clásico propuesto en el modelo piramidal ISO/OSI. Sin embargo, recientes investigaciones en el área de la Inteligencia Artificial Distribuida y, en específico, del Control Distribuido Inteligente (CDI) (PABADIS, 2002-2006) (Jennings & Bussmann, 2003)(Bravo, *et al.*, 2005)(Marik & Vrba, 2005), apuntan hacia arquitecturas de carácter colaborativo, donde la autonomía y la inteligencia son implantadas en los dispositivos de campo y en las plataformas de aplicaciones, en la búsqueda de disponer de una estrategia flexible que se adapte rápidamente a los cambios en los esquemas de producción.

Hay que destacar que la mayor parte de los aportes científicos-tecnológicos en el área de CDI, están orientados a los procesos de manufactura (PABADIS, 2002), (Marik & Vrba, 2005) en donde los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES) son redimensionados como sistemas multiagentes, en los cuales los Sistemas de Planificación de Empresa (ERP) tienen un rol fundamental en la planificación de la producción. En cambio, en los procesos de producción continua no es común que un sistema ERP sea el centralizador de la planificación de la producción, y no se ven con frecuencia sistemas análogos a los MES para la programación

de tareas en las instalaciones, por lo que este tipo de procesos plantean un interesante reto para el área de CDI.

El avance de los modelos de automatización industrial hacia esquemas distribuidos ha sido habilitado por la evolución de las plataformas de Tecnología de Información (TI) de los últimos años. En las últimas tres décadas, las arquitecturas de TI han ido evolucionando rápidamente, desde los sistemas mainframe, pasando por el dominio de los computadores personales y aplicaciones stand-alone, hasta la arquitectura Cliente-Servidor, y más recientemente, la Arquitectura Orientada a Servicios (SOA, por sus siglas en inglés). Por otro lado, se ha hecho necesario que las aplicaciones y sistemas inter-operen y cooperen intercambiando información y servicios, para lograr una automatización integrada de la empresa. Además, también los dispositivos de control de procesos han ido aumentando su capacidad de procesamiento, permitiendo que puedan ejecutarse aplicaciones empresariales sobre los mismos, favoreciendo la distribución de las plataformas de TI de la empresa.

En el área de la definición de modelos de procesos de negocio también ha habido mucho interés de grupos de investigación y de las industrias de TI. En el sector de investigación se han propuesto una serie de marcos de trabajo y de lenguajes que permiten establecer los flujos de información y productos en las empresas, siendo uno de los esfuerzos más notable el realizado en los estándares SP 88 (ISA, 1995) y SP 95 (ISA, 2000) de la ISA (International Society of Automation), y los lenguajes derivados de los mismos como B2MML (World Batch Forum, 2004) y PSLX (PSLX Consortium, 2005). En el sector de la industria de TI se han propuesto técnicas para el análisis y modelado de procesos de negocio (BPA y BPM, respectivamente), y la definición de lenguajes, en general soportados sobre XML, para la implantación de dichas técnicas, entre los que destacan el Lenguaje de Definición de Procesos en XML (XPDL), el Lenguaje de Ejecución de Procesos de Negocio (BPEL) y RossetaNET (Litchicum, 2004). En la industria de petróleo se han realizado esfuerzos por la generación de ontologías para integración de aplicaciones especializadas, entre los cuales resaltan WITSML (POSC, 2003-2006), PRODML (POSC, 2006), y la Ontología de Petróleo y gas (OGO) (POSC, 2009).

Sobre el tema de Gestión Integrada de Producción, en la literatura se encuentran estudios realizados en el sector de Petróleo y Gas, definidos como Gerencia Integrada de Yacimientos, que plantean la integración de todos los sistemas de información de la empresa con el fin de obtener toda la información relacionada con el negocio, desde los datos estáticos de información geológica y petrofísica del yacimiento, hasta la información de producción en tiempo real y de gestión del negocio, con el fin de generar el plan óptimo de explotación del yacimiento (Satter & Thakur, 1994). Es así como en diversas industrias de producción de petróleo se están llevando a cabo proyectos de desarrollo tecnológico que apuntan al concepto de Gerencia Integrada de Yacimientos,

entre los que destacan el Proyecto de Integración de Operaciones en el Mar del Norte (POSC, 2009), que lleva adelante el Consejo de Investigación Científica de Noruega y Statoil®, en conjunto con múltiples empresas de servicios, y los proyectos Smart Field de Shell® (Potters & Kapteijn, 2005) y Field of the Future de BP® (Reddick, 2007)(Sisk, Fanty, & Knox, 2007). Este tipo de modelo plantea a la automatización industrial como medio para la planificación de producción y no como un fin en sí misma, idea básica del concepto de Gerencia Integrada de Producción propuesto en este trabajo. La Gerencia Integrada de Producción se propone como una extensión del concepto de Gerencia Integrada de Yacimientos, para cualquier tipo de proceso de producción continua (Bravo, 2010).

3. Gestión Integrada de Producción

En las industrias de producción continua, uno de los problemas más importantes es la dificultad en el acceso a toda la información sobre el estado del proceso de manera oportuna, exacta e integrada. En general, para la gestión de este tipo de industrias deben trabajar coordinadamente varios departamentos, cada uno de los cuales con una visión parcial del proceso de producción. Sin embargo, para una toma de decisiones acertada y oportuna es necesario disponer de una visión global de todo el proceso productivo. En ese sentido, se han desarrollado diversas teorías para la Gerencia Integrada de Producción, también llamada Gerencia Integrada de Activos (Zhang, et al., 2006), cuyo significado agrupa un conjunto de formas de trabajo y tecnologías que permiten a todos los actores responsables de la toma de decisiones disponer de la información en tiempo real del estado del activo, y trabajar en conjunto para el manejo del mismo. Un activo es el conjunto de recursos, métodos, instalaciones y demás elementos requeridos para planificar, programar, ejecutar y controlar un proceso de producción.

Para lograr el objetivo de la Gerencia Integrada de Producción, se hace necesario cumplir con lo siguiente:

Acceder a los múltiples sistemas y aplicaciones que son fuentes de la información del estado del proceso de producción. Los diferentes departamentos en una industria de producción continua utilizan sistemas muy sofisticados que están destinados a realizar tareas específicas, pero que, en general, no se integran ni comparten sus datos con otros sistemas. Se hace necesario, entonces, desarrollar mecanismos para extraer la información de los diferentes sistemas que sirven a dichos departamentos y hacerla disponible a otros sistemas y/o usuarios.

La información transmitida entre las diversas aplicaciones y sistemas debe estar enmarcada en un lenguaje establecido con términos inteligibles para cada una de dichas aplicaciones, esto es, debe existir un marco ontológico común para todas las aplicaciones, de forma que el intercambio de información se realice sin riesgos de interpretaciones erróneas o de pérdidas de integridad.

Los flujos de trabajo dentro de la empresa deben automatizarse para optimizar el análisis de la información de su estado y favorecer la toma de decisiones oportuna. La información del estado de los diferentes componentes de la empresa debe estar disponible para cada actor del proceso de toma de decisiones de manera oportuna y exacta, y las acciones o recomendaciones de cada actor deben poder ejecutarse en tiempo real y deben ser visibles para el resto de personal que interviene en la toma de decisiones. Deben existir herramientas que permitan el análisis en tiempo real de la información, para lograr una visión global del estado de la empresa, a través de indicadores claves del proceso (KPI, por sus siglas en inglés).

Dicho todo lo anterior, podemos definir la Gerencia Integrada de Producción como el proceso en el cual la información, acerca de todos los aspectos de la producción de la empresa, es manejada integralmente para definir y actualizar continuamente el plan óptimo de producción. La Gerencia Integrada de Producción permite la reconfiguración flexible de los procesos de la empresa para adaptarlos, en tiempo real, a los cambios de estrategia, táctica y de condiciones de operación de la empresa.

4. Descripción General de la Arquitectura

La arquitectura de referencia que se propone, consiste de las herramientas tecnológicas requeridas para la adquisición, procesamiento y análisis del estado del proceso de producción en una industria de producción continua y para la automatización de procesos de negocio y de toma de decisiones. La arquitectura planteada consta de tres capas: la primera capa se denomina “capa de conectividad”, en la cual se definen los mecanismos de adquisición, procesamiento e interpretación de los datos; la segunda capa se denomina “capa semántica”, en la cual se define el marco ontológico para el intercambio de información entre las diversas aplicaciones que se manejan en el proceso de producción; y la tercera capa, denominada “capa de gestión”, establece los mecanismos de automatización inteligente de los flujos de trabajo de la empresa. En la Figura 1 se muestra la arquitectura propuesta.



Figura 1: Arquitectura de Referencia.

A continuación se realiza una descripción general de cada capa que compone la arquitectura.

4.1. Capa de Conectividad

Uno de los problemas fundamentales en materia de tecnología de Información para la industria de producción continua es la integración de aplicaciones empresariales. En la industria es común encontrar aplicaciones muy sofisticadas para resolver problemas concretos (por ejemplo, simuladores de procesos, sistemas de control y supervisión, herramientas de análisis económico, etc.), pero que no se integran entre sí, generando problemas de inter-operatividad que impiden tener una visión integral del estado del proceso productivo. Para abordar este problema se propone una capa de integración, denominada en este trabajo Capa de Conectividad, la cual permita acceder a la información requerida para la operación del proceso de producción.

El objetivo de la capa de integración es “envolver” las aplicaciones y sistemas disponibles en la empresa, mediante adaptadores de software que permiten acceder a sus datos y funciones y exponerlos en una capa común. Para tal fin, la capa de conectividad debe cumplir con las siguientes funciones:

Extracción de datos: en primer lugar, se deben obtener los datos desde su origen, esto es, desde la aplicación que los genera. Para esto se deben utilizar los medios de extracción de información que provea la aplicación, los cuales generalmente son interfaces o librerías de acceso a datos (API: Application Programming Interfaces). En algunos casos, la misma aplicación provee sus datos a través de servicios web, lo cual simplifica el acceso a los mismos ya que sólo deben invocarse dichos servicios. También, los datos pueden provenir de Sistemas Manejadores de BD que utilizan ciertas lógicas de negocio para proveer sus datos, a través de librerías o estándares, como por ejemplo ODBC (Open Database Connectivity), DAO (Data Access Object) o JDBC (Java Database Connectivity). Finalmente, existen aplicaciones que no proveen ningún mecanismo de acceso a sus datos, por lo que para estos casos será necesario desarrollar alguna interfaz que interactúe con la aplicación y obtenga sus datos; la complejidad en el desarrollo de las interfaces dependerá de la aplicación de la que se requiera la información.

Exposición de datos: una vez extraídos los datos de sus aplicaciones de origen, los mismos deben ser expuestos de forma tal de que estén disponibles para el resto de las aplicaciones de la plataforma de TI de la empresa. Para esto se sugiere el uso de “envoltorios” de software para exponer los datos en un esquema común en lenguaje XML (Extensible Markup Language). Los envoltorios tienen la función de enmascarar las interfaces de acceso a datos de cada aplicación, a través de archivos XML que uniformizan cómo las aplicaciones obtienen la información. Estos archivos XML consisten en Servicios Web que pueden ser invocados por las

aplicaciones, que tienen bien definidas sus funciones y parámetros de calidad en un acuerdo de servicio denominado “Lenguaje de Definición de Servicios Web (WSDL)”. A través del WSDL, cada aplicación puede saber exactamente cómo obtener información de otra aplicación. Adicionalmente debe haber un repositorio de servicios en dónde se encuentren todos los WSDL de los servicios provistos por la capa de conectividad. En ese sentido, cada aplicación de la plataforma de TI de la empresa debe contar con por lo menos un Servicio Web para el acceso a sus datos y, de manera correspondiente, con un WSDL que indique como se puede acceder a dichos datos y los parámetros de calidad con los que serán provistos. En la Figura 2 se esquematiza cómo se organiza la capa de conectividad a través de un diagrama de componentes UML.

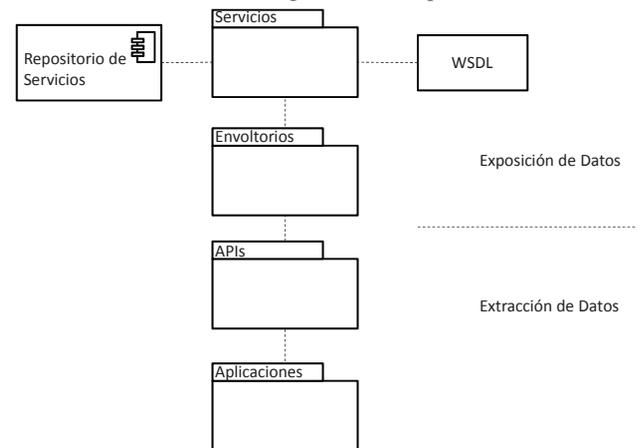


Figura 2: Capa de Conectividad.

Ya que en una industria de producción continua hay gran demanda de información en todo momento, en la capa de conectividad se deben resolver problemas de balance de carga, enrutamiento de mensajes, persistencia y demás problemas de infraestructura que son necesarios resolver para la integración de las aplicaciones de la empresa, los cuales deben formar parte de los servicios de infraestructura de su plataforma de TI. Por esta razón, se requiere que la capa de conectividad esté implementada sobre un Bus de Servicios Empresariales, *Middleware*, o alguna herramienta similar, que permita gestionar la cantidad de servicios de acceso a datos de los que dispone la empresa, resolviendo los problemas mencionados anteriormente.

La idea de esta capa es aprovechar al máximo la infraestructura instalada de la empresa, incorporándola en la arquitectura propuesta a través de los adaptadores antes mencionados, para potenciar las aplicaciones existentes con los conceptos planteados en la arquitectura, pero tratando de minimizar el impacto al momento de su implantación. Además, dicha capa debe permitir incorporar a la arquitectura sistemas y aplicaciones de terceros.

4.2. Capa de Semántica

La segunda capa de la arquitectura está constituida por las herramientas que permitirán el análisis semántico de la información obtenida de las diferentes aplicaciones presentes en la plataforma de TI de la empresa. Esta capa, denominada “Capa Semántica”, constituye un marco ontológico en el cual se definen todos los conceptos manejados para la operación del proceso de producción. La misma busca establecer un lenguaje único para el intercambio de datos entre diversas aplicaciones y así garantizar la integración de las mismas para obtener una visión global del proceso de producción.

El modelo de datos presentado en este trabajo define la ontología que permite describir los objetos de negocio de la empresa sobre su plataforma de TI. El mismo permitirá realizar la interpretación de manera coherente de todos los elementos de la empresa sobre la plataforma de TI, estableciendo una ontología común a utilizar para la integración de los diversos sistemas y aplicaciones disponibles en la misma. A continuación se describen cada uno de los elementos que componen el marco ontológico propuesto.

4.2.1. Meta data

Para la construcción de la Ontología se define una estructura general para los conceptos, que organiza la información o meta-información que se tiene de cada elemento dentro de la arquitectura. Tomando como referencia la estructura presentada en (Soma, et al., 2008), se definen tres tipos de información que debe disponer cada elemento dentro de la ontología.

Meta-data de Acceso: establece el origen de la información de cada elemento en la ontología. Este origen puede ser la aplicación que genera la información, la dirección del archivo que la contiene, la dirección URL de donde se encuentra la información, la dirección IP del servidor de aplicaciones que la genera, la localización de la BD en donde esté almacenada, etc.

Meta-data de Creación: es la información sobre la persona o proceso que genera la información. Generalmente tiene que ver con el nombre del usuario, o el proceso, que generó la información.

Meta-data Específica de la Información: es la información sobre el contenido expresado por el elemento de la ontología. Dependerá del sentido del concepto y, en general, es un resumen conciso sobre los elementos más importantes que involucra el concepto.

Asociar meta-data a cada concepto de la ontología, servirá como herramienta para optimizar búsquedas de conceptos en la Capa de Semántica y para utilizar los conceptos como mecanismos de integración entre aplicaciones, ya que al disponer datos acerca de la localización y origen de la información, el acceso a la misma se puede realizar de una forma eficiente.

4.2.2. Ontologías de carácter general

Este componente agrupa todos los conceptos que son de uso general en cualquier ámbito, independientemente del tipo de industria en la cual sea implementada la arquitectura. Los conceptos utilizados en la Ontología de Carácter General son extraídos de ontologías ya definidas, ya que esto permite re-usar conceptos establecidos y ampliamente aceptados y reducir el esfuerzo en la construcción de la Capa de Semántica.

Un ejemplo de ontologías de carácter general son las Ontologías Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET), desarrolladas por la NASA (Raskin, 2009). Estas ontologías contienen una gran cantidad de conceptos relacionados con las áreas de ciencias e ingeniería, categorizadas en diversos dominios. Las ontologías SWEET están accesibles a través de una dirección web, lo que permite reutilizar sus conceptos en nuevas ontologías que se creen.

4.2.3. Meta-modelo de datos

El meta-modelo de datos es una estructura común para describir cada uno de los objetos de negocio de la empresa (Bravo, et. al, 2008). En nuestro caso, recordando que estamos proponiendo una arquitectura de integración para un modelo de producción basado en la idea de “Gerencia Integrada de Producción”, el concepto clave a definir es la unidad de producción. Para definir el meta-modelo de datos nos basamos en dos propuestas: el estándar PRODML (POSC, 2006) y el modelo PROSA (Wyns, 1999).

El meta-modelo define una arquitectura común para los conceptos relacionados con las unidades de producción, haciendo uso del planteamiento realizado en las arquitecturas holónicas (Wyns, 1999), en donde cada unidad de producción se compone de Productos, Recursos y Órdenes, y se les otorga el nombre de holón. En este tipo de arquitecturas, todas las unidades de producción de la empresa, desde la más simple (por ejemplo, una máquina) hasta la más compleja (por ejemplo, toda la empresa), se modela como un holón, estableciendo una estructura genérica de representación de los elementos de la empresa.

En este trabajo se ha utilizado el concepto de holón y se ha adaptado para definir una estructura para las Unidades de Producción. En ese sentido, el meta-modelo está compuesto por la Unidad de Producción como elemento central, la cual tiene asociados “Recursos” que necesita para el proceso de producción, mismos que son provistos por “Proveedores”; también se asocian “Métodos” a la Unidad de Producción, los cuales son los mecanismos que utiliza para generar los “Productos” que son despachados a los “Clientes”. Finalmente, se define una “Condición” de la Unidad de Producción, que define el estado en el cual se encuentra la misma, la cual es alterada por eventos generados por causas

externas o por la aplicación de un método determinado. En la Figura 3 se puede observar la estructura del Modelo de Datos propuesto.

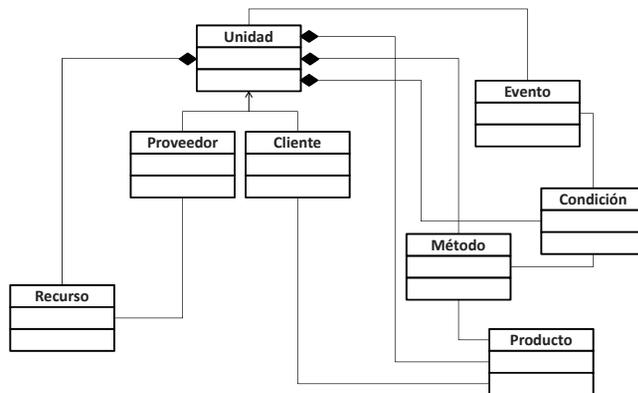


Figura 3: Meta-modelo de datos.

4.2.4. Conceptos de dominio específico

Cada empresa tiene una serie de conceptos particulares que les son propios y que puede compartir o no con otras empresas. Para representar estos conceptos dentro de la ontología se definen los Conceptos de Dominio Específico, que son todos aquellos conceptos relacionados con el proceso productivo particular de cada empresa en la que se implante la arquitectura. Estos conceptos se definen como instancias del meta-modelo de datos, esto es, cada concepto de dominio específico deberá corresponderse con los conceptos definidos en el meta-modelo.

Así, dentro de los conceptos de dominio específico deben definirse las unidades de producción, recursos, productos, condiciones y métodos específicos de la empresa en la que se está implantando la arquitectura. Al construir los conceptos de dominio específico como una instancia del meta-modelo de datos, se garantiza una estructura común para los conceptos de la empresa, que facilitará el intercambio de información en la arquitectura.

En nuestro caso en particular, que es el proceso de integración de empresas de producción continua bajo el paradigma de “Gerencia Integrada de Producción”, algunos de los conceptos de dominio específico en este caso, instancia del meta-modelo de datos, son: Producción Potencial, Producción Actual, Disponibilidad de Recursos, Falla, Orden de Mantenimiento.

4.3. Capa de Gestión

4.3.1. Descripción General

La capa de gestión tiene como objetivo, una vez resueltos los problemas de acceso y procesamiento de la información de la empresa a través de las capas que se acaban de describir, automatizar los flujos de trabajo necesarios para el manejo de la misma. En el mercado y en la literatura se encuentran diversas herramientas para automatización de flujos de trabajo, sin embargo, el enfoque que se propone en este trabajo apunta más hacia la gestión automática e inteligente de los procesos de producción mediante el uso de técnicas y herramientas de inteligencia artificial distribuida. Para la Capa de Gestión se propone el uso de Sistemas Multiagentes (SMAs), en específico, de una especialización de los mismos denominada Instituciones Electrónicas (Arcos, *et al.*, 2005).

Los sistemas multiagentes son una clase de sistemas computacionales capaces de tomar acciones de forma autónoma para alcanzar sus objetivos. Los agentes de software son capaces de decidir por sí mismos qué hacer en una determinada situación. Los agentes mantienen información acerca de su entorno y toman decisiones en función de su percepción del estado de dicho entorno, sus experiencias anteriores y los objetivos que tienen planteados. Además, los agentes pueden comunicarse con otros agentes para colaborar y alcanzar objetivos comunes. Los sistemas multiagentes han tenido aplicaciones interesantes en el mundo industrial, por ejemplo, en la industria de petróleo se ha utilizado para el manejo de información en flujos de trabajo para manejo de portafolios de ventas de crudo y manejo de terminales de embarque (Olmheim, *et al.*, 2008).

Las Instituciones Electrónicas (Arcos, *et al.*, 2005) (Esteve, *et al.*, 2001) (Noriega, *et al.*, 2002) (Sierra, 2004) (García-Camino, *et al.* 2005) son una especialización de los sistemas multiagentes, que define el comportamiento de los SMA en base a normas socialmente vinculantes, emulando el comportamiento de los humanos en las instituciones sociales. Las instituciones electrónicas (IEs) dan forma a SMAs, restringiendo el comportamiento de los agentes, para asegurar la interacción de los mismos en condiciones seguras. Las IEs restringen el comportamiento de los agentes, definiendo una secuencia lógica de interacciones dialógicas que los agentes pueden mantener para alcanzar sus metas (García-Camino, *et al.*, 2005). De esta forma, se sigue aprovechando el comportamiento emergente de los agentes (dada su autonomía), pero se restringe su acción a un entorno de comportamiento seguro en donde se definen roles y reglas que están orientadas a alcanzar las metas del sistema, emulando el comportamiento social de los seres humanos en cualquier institución de la sociedad. Se propone crear una Institución Electrónica (IE), con el objetivo de aprovechar el comportamiento emergente de los agentes, para abordar el problema de automatización de flujos de trabajo en tiempo real, pero acotando sus comportamientos mediante reglas que garantizan la respuesta del sistema dentro de las restricciones de tiempo propias de la empresa, bajo las condiciones de seguridad y ambiente establecidas en ella.

El diseño de una Institución Electrónica comienza con la identificación de los flujos de trabajo que serán automatizados a través de la arquitectura multiagentes. Para efectos de este trabajo, cuyo foco es la Gerencia Integrada de Producción, el flujo de trabajo base para la IE será el Proceso de Producción de una Industria de Producción Continua. Dicho proceso de negocio es un flujo de trabajo compuesto por tres procesos fundamentales: 1) Programación de la Producción, 2) Producción y 3) Despacho de Producción. Cada uno de ellos se describe a continuación.

Programación de la Producción: tal y como se observa en la Figura 4, el primer proceso al inicio del flujo de trabajo es la Programación de la Producción. En este proceso se definen las cuotas de producción a asignar a cada unidad de producción, con el objetivo de cumplir la meta que tiene la empresa. El resultado del proceso de programación de la producción es la asignación de cuotas de producción a cada uno de las unidades de producción, acompañada de la respectiva asignación de recursos requeridos.

Producción: consiste del conjunto de actividades requeridas para la generación del producto, en base a la configuración establecida en la programación de la producción. Este proceso tiene como entradas las cuotas de producción/recursos por unidad de producción, y como salidas las ratas de producción para todo el activo en un horizonte de tiempo determinado.

Despacho de Producción: corresponde a la entrega al cliente final de la producción acumulada de la empresa en un momento dado. Este proceso tiene como entrada la rata de producción de la empresa, y como salida la cantidad total despachada a cada cliente.

4.3.2. Definición de la Institución Electrónica

Para construir la IE se realizará una “reflexión*” del flujo de trabajo antes descrito a una serie de escenas y transiciones en las que participan diversos agentes, la cual se denomina “estructura performativa”. Así, la IE está compuesta por una serie de agentes que desempeñan roles específicos en escenas predefinidas, de acuerdo a los procesos de negocio que se llevan a cabo en el activo. El rol principal de la IE es el de Productor, el cual es desempeñado por la o las Unidades de Producción que generan la producción objetivo de la institución. Tal y como se define en la Capa de Semántica, cada Unidad de Producción requiere de recursos, los cuales son obtenidos de Proveedores, y genera productos requeridos por Clientes. En consecuencia, dentro de la IE se definen roles para los Proveedores y los Clientes de las Unidades de Producción. Un conjunto de Productores, Proveedores y Clientes se organizan en un Activo (ver definición de activo en la Sección 2). Para cada activo debe haber una agente que

* Reflexión se refiere a la representación de los flujos de trabajo que ocurren en la empresa sobre su plataforma de tecnología de información, con el objetivo de automatizar dichos flujos.

cumple el rol de Gestor del Activo, el cual es responsable de la programación, ejecución y control del proceso de producción. Finalmente, se definen dos roles de agentes especializados que cumplen labores de optimización de procesos y de mantenimiento, estos dos roles son los de los agentes Optimizadores y Mantenedores. El conjunto de roles y sus relaciones, conforman el marco de diálogo de la IE.

Los agentes que participan en la IE deben utilizar la información generada por la capa de conectividad y registrarse por el marco ontológico de la capa de semántica para el intercambio de dicha información entre los mismos, es decir, la ontología utilizada en el Marco de Diálogo de la IE es la definida en la Capa Semántica de la arquitectura.

La estructura principal de la IE (estructura performativa) para el Proceso de Producción de una Industria de Producción Continua, según el paradigma de “Gerencia Integrada de Producción”, se describe a través la Figura 4, allí están representadas las escenas principales y las transiciones entre ellas.

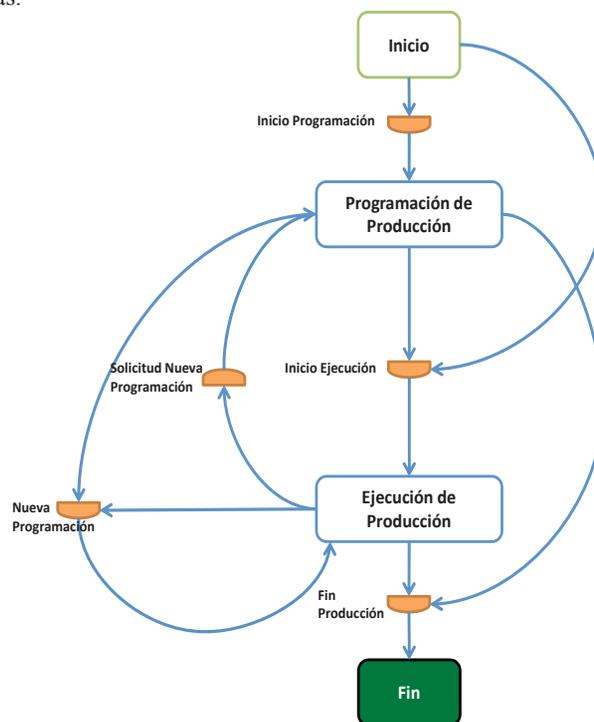


Figura 4: Estructura principal de la Institución Electrónica.

En la estructura performativa se definen dos escenas principales: Programación de la Producción y Ejecución de la Producción. Cada escena se constituye de protocolos de intercambio de información entre los diversos agentes que harán vida dentro de la IE. Dichas escenas son representadas por sub-estructuras performativas. Así, la escena de Programación de Producción consta de dos escenas: “Búsqueda de Información” y “Cálculo de Cuotas de Producción”, como se observa en la Figura 5.

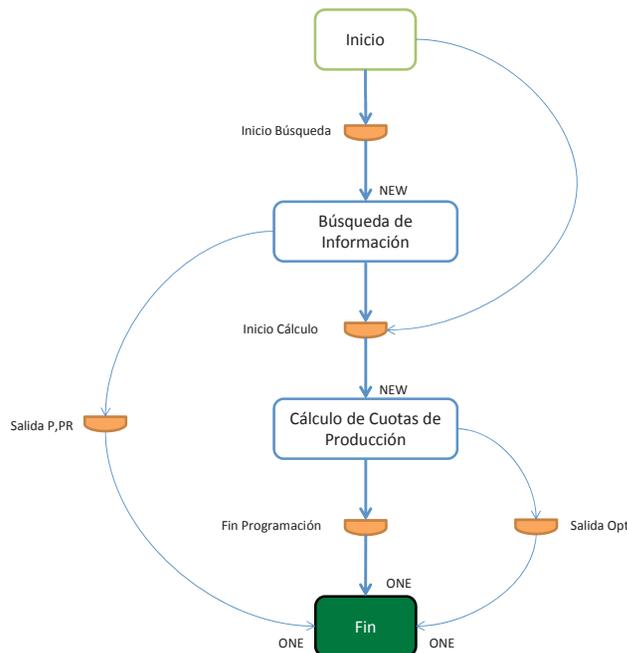


Figura 5: Estructura de Programación de Producción.

En la primera escena de la sub-estructura Programación de Producción, el agente Gestor del Activo solicita a los agentes que representan Unidades de Producción la información sobre su estado, de forma de obtener una visión global del estado del activo. Dicha escena está definida por un protocolo de comunicación entre agentes que se describe en la Figura 6.

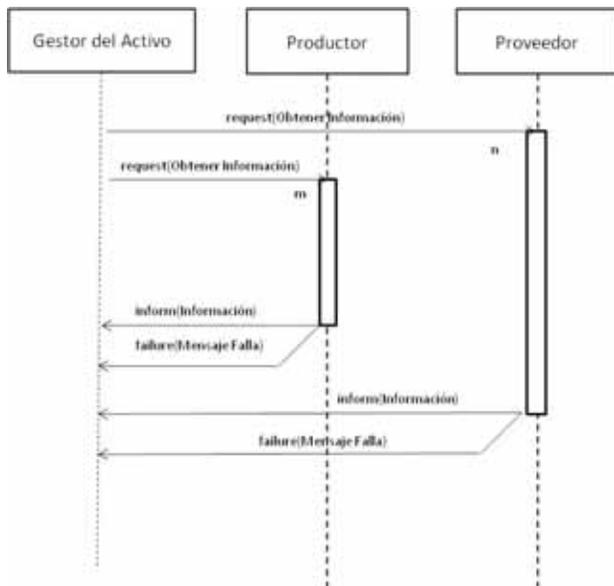


Figura 6 Protocolo de Búsqueda de Información.

En la escena “Cálculo de Cuotas de Producción”, los agentes Gestor del Activo y Optimizador calculan las cuotas óptimas de asignación de recursos y cuotas de producción para cada unidad de producción dentro del activo. Esta escena está

definida por el protocolo de comunicación entre agentes descrito en la Figura 7.

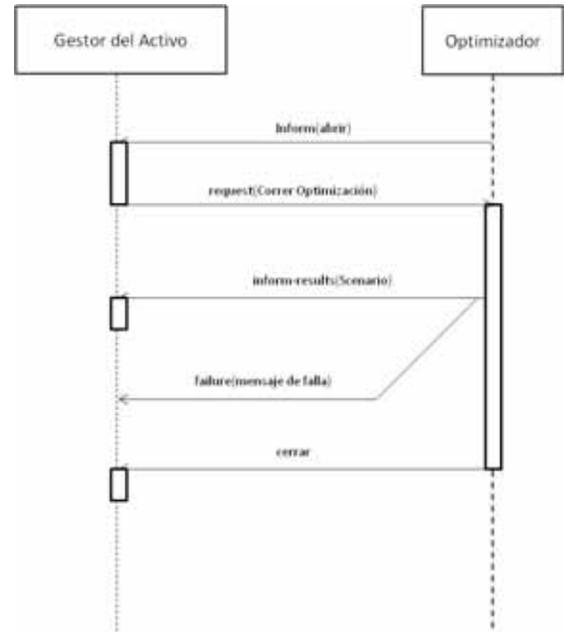


Figura 7 Protocolo de Cálculo de Cuotas de Producción.

La escena “Ejecución de la Producción”, de la estructura performativa principal, está definida por la sub-estructura performativa que se describe en la Figura 8.

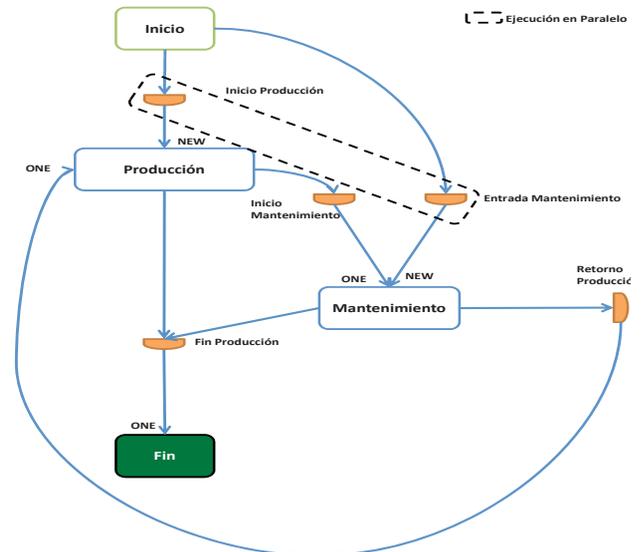


Figura 8 Estructura de Ejecución de Producción.

Dicha sub-estructura consta de dos escenas: “Producción” y “Mantenimiento”. La escena de producción está definida por el protocolo de comunicación entre agentes, que se describe a través de la Figura 9.

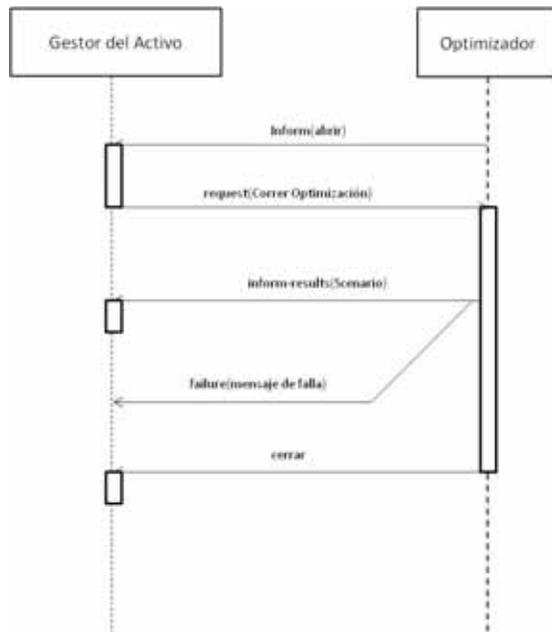


Figura 9 Protocolo de Producción.

El comportamiento de los agentes dentro de la Institución Electrónica está regulado por Normas, orientadas a garantizar el objetivo de la Institución, el cual, en nuestro caso, es alcanzar la meta de producción de la empresa, optimizando el uso de los recursos, cumpliendo con las restricciones de tiempo establecidas para el proceso que se está automatizando. A continuación se presentan las normas definidas para la institución electrónica.

Norma para obtención de información del rol Proveedor:

Con esta norma se establece un límite de tiempo para que el agente con rol Proveedor entregue la información solicitada por el Gestor del Activo en la escena Búsqueda de Información. La norma tiene la siguiente forma:

Escena: Búsqueda de Información.

Ilocución: Informar Resultados

Emisor: Proveedor

Receptor: Gestor del Activo

Contenido: Información del Proveedor

Obligación: emitir la ilocución antes que se cumpla un tiempo t_{max} (donde t_{max} es un parámetro establecido por el usuario).

Norma para obtención de información del rol Productor:

Con esta norma se establece un límite de tiempo para que el agente con rol Productor entregue la información solicitada por el Gestor del Activo en la escena Búsqueda de Información. La norma tiene la siguiente forma:

Escena: Búsqueda de Información

Ilocución: Informar Resultados

Emisor: Productor

Receptor: Gestor del Activo

Contenido: Información del Productor

Obligación: emitir la ilocución antes que se cumpla un tiempo t_{max} (donde t_{max} es un parámetro establecido por el usuario)

Norma para cálculo de escenario óptimo de producción:

Con esta norma se establece un límite de tiempo para que el agente con rol Optimizador calcule el escenario óptimo de producción y entregue información sobre el mismo al Gestor del Activo, en la escena Cálculo de Cuotas de Producción. La norma tiene la siguiente forma:

Escena: Cálculo de Cuotas de Producción

Ilocución: Informar Resultados

Emisor: Optimizador

Receptor: Gestor del Activo

Contenido: Escenario óptimo de producción

Obligación: emitir la ilocución antes que se cumpla un tiempo t_{max} (donde t_{max} es un parámetro establecido por el usuario)

Norma para la ejecución de producción:

Con esta norma se establece un límite de tiempo para que los agentes con los roles Productor, Proveedor y Cliente inicien la ejecución de la producción en base al escenario estipulado por el Gestor del Activo, en la escena Producción. Para este caso existe una norma por cada rol participante de la ejecución de producción. Dicha norma tiene la misma forma para todos los roles:

Escena: Producción

Ilocución: de acuerdo

Emisor: Productor, Proveedor, Cliente

Receptor: Gestor del Activo

Contenido: agree

Obligación: emitir la ilocución antes que se cumpla un tiempo t_{max} (donde t_{max} es un parámetro establecido por el usuario).

Si bien en este trabajo no se presenta el comportamiento interno de los agentes, se presenta una arquitectura de referencia en la cual se incluyen este tipo de componentes de software como herramientas para la automatización de procesos de negocio y los mecanismos para su interacción, teniendo como objetivo alcanzar las metas establecidas para dichos procesos. Utilizar sistemas multiagentes permite aprovechar las virtudes de este tipo de sistemas (inteligencia, reactividad, proactividad, sociabilidad, cooperación) para aportar flexibilidad a la gestión automática de los procesos de negocio y aportar mecanismos emergentes para la optimización de dichos procesos a partir de la cooperación entre los agentes. El diseño interno de cada agente y sus respectivos modelos de comportamiento serán objeto de trabajos futuros, pero en la propuesta aquí presentada se

establecen las normas fundamentales para utilizar sistemas multiagentes en el área de automatización industrial, garantizando el cumplimiento de restricciones de tiempo naturales de este tipo de procesos, a partir del uso de instituciones electrónicas.

5. Caso de Estudio

En este caso de estudio se abordará la implantación de la arquitectura desarrollada con el objetivo de garantizar la producción óptima de un campo de producción de petróleo. Para esto se definirán una serie de adaptadores de software (SW), para obtener los datos de aplicaciones especializadas del dominio de producción de petróleo (Capa de Conectividad), se diseñará una ontología para dicho dominio que se almacenará en un repositorio de conceptos (Capa de Semántica) y se realizará la implantación de la institución electrónica descrita en la sección 3, para gestionar las unidades de producción que participan en dicho proceso (Capa de Gestión).

La implantación de la arquitectura (ver Figura 10), tiene como objetivo calcular automáticamente la configuración de las unidades de producción para maximizar la producción de petróleo, de forma de maximizar las ganancias del campo, minimizando sus costos.

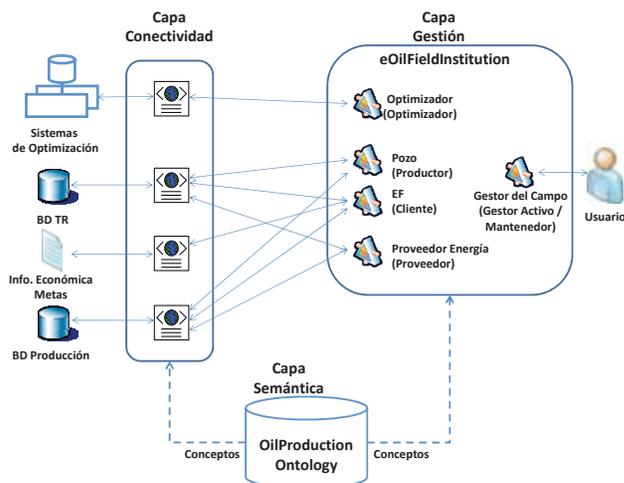


Figura 10 Arquitectura para el Caso de Estudio.

A continuación se realizará una descripción de los elementos considerados en cada una de las capas.

5.1. Capa de Conectividad

Para llevar a cabo el proceso de producción de petróleo es necesario acceder información de múltiples fuentes de datos. Entre las fuentes de datos más importantes se encuentran:

Base de Datos de Producción: almacena los datos correspondientes a la configuración de las instalaciones de producción existentes en el campo (pozos, estaciones de flujo, plantas, múltiples, etc.). Para cada una de ellas se almacena la

información sobre su configuración (partes, tipo), su producción potencial y real y la calidad de su producto. Generalmente, las bases de datos de producción se manejan a través de bases de datos relacionales. El acceso a estas fuentes de datos se realiza a través de controladores (drivers) de acceso a datos estándares, tales como ODBC o JDBC.

Base de Datos de Tiempo Real: almacena los valores de las variables de los procesos asociados a cada facilidad de producción. Almacena datos históricos de estas variables, con una periodicidad que depende del proceso monitoreado. Dependiendo de las restricciones de seguridad de la empresa, los datos de tiempo real pueden ser generados por sistemas SCADA o por sistemas de almacenamiento de datos históricos. El acceso a estas fuentes de datos se realiza a través de interfaces (APIs) provistas por los fabricantes de las mismas.

Información Económica y Metas: almacena la información relativa a los costos de operación (OPEX), los precios de venta del producto final y las metas de producción para el campo. En general, este tipo de información se almacena en sistemas empresariales de gestión (ERPs), los cuales proveen interfaces para poder acceder a sus datos.

Sistemas de Optimización: son sistemas que calculan distintos escenarios de producción en base a la configuración para el campo y las metas de producción establecidas, en los cuales la función objetivo es maximizar la ganancia y minimizar los costos de operación. Actualmente, estos sistemas proveen la facilidad de construir modelos subsuelo/superficie, que incluyen los modelos de los pozos y de la red de superficie (tuberías, estaciones de flujo, plantas, múltiples, etc.). El mecanismo de acceso a estos sistemas es a través de un conjunto de interfaces provistas por el fabricante.

Para cada fuente de datos se plantea la construcción de adaptadores como un servicio Web, que permiten extraer la data requerida y exponerla en formato XML. Las estructuras de datos que entregan los adaptadores de SW mencionados anteriormente se corresponden con los conceptos almacenados en el repositorio de la capa de semántica.

5.2. Capa de Semántica

En la capa de semántica se definen los conceptos más importantes del dominio de producción de petróleo. La ontología descrita para este caso de estudio se denomina "OilProductionOntology (Ontología de Producción de Petróleo)"; la misma se compone de los Conceptos de Dominio Específico definidos para la Capa de Semántica, los cuales están fundamentados en el Meta Modelo de Datos y utilizan conceptos de las Ontologías de Carácter General, descritos en la sección 5.

Siguiendo el enfoque propuesto en (Soma, et al., 2008), los conceptos de carácter general a utilizar en la Capa de

Semántica serán los propuestos en las Ontologías de la Web Semántica para la Terminología de Ciencias de la Tierra y el Ambiente (SWEET) (Raskin, 2009). Estos conceptos servirán como base para la construcción de la OilProductionOntology.

Los conceptos de la Ontología SWEET utilizados para la construcción de la Capa de Semántica son Entidad Temporal, en el cual se definen nociones referentes a unidades de medición de tiempo, Estados del Sistema, donde se definen los posibles estados en el que puede estar un sistema, e Infraestructura, en el cual se definen conceptos sobre facilidades y equipos utilizados en ambientes de producción (Raskin, 2009).

Para la construcción de los conceptos de dominio específico que componen la OilProductionOntology, se creó dentro de la ontología un concepto denominado “Concepto de Producción de Petróleo (Oil Production Concept)”, el cual agrupa a todos los conceptos relativos al dominio de producción de petróleo. De esta manera se crea un sub-conjunto para los Conceptos de Dominio Específico, estableciendo una distinción entre los mismos y los conceptos provenientes de las Ontologías de Carácter General utilizados (SWEET) y del Meta-modelo de Datos.

La OilProductionOntology tiene como centro de sus conceptos las unidades de producción existentes en un campo petrolero. Alrededor de la definición de estas unidades de producción se desarrollan el resto de los conceptos de la ontología, los cuales están estructurados de acuerdo al Meta Modelo de Datos.

5.3. Capa de Gestión

En la capa de gestión se realizó una implantación de la institución electrónica descrita en Sección 3; a dicha implantación se le ha denominado “e-OilFieldInstitution”.

e-OilFieldInstitution cuenta con el marco de diálogo y la estructura performativa descritos en la sección 3, esto es, se utilizan todos los roles, ilocuciones, escenas y transiciones descritas en esa sección. Así mismo, la institución implantada hace uso de la “Oil Production Ontology” en los contenidos de los mensajes intercambiados por los agentes de la institución.

Para cumplir con los roles descritos en el marco de diálogo, se diseñó una colección de agentes para el dominio de producción de petróleo, los cuales constituyen un sistema multiagentes denominado OilFieldMAS (Oil Field Multiagent System: Sistema Multiagente Campo Petrolero). Los agentes del OilFieldMAS se clasifican en dos categorías: Unidades de Producción y Agentes de Servicio. En la Figura 11 se muestran los componentes del OilFieldMAS.

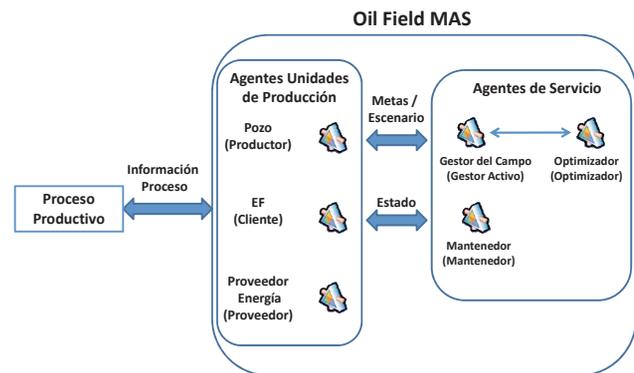


Figura 11 Oil Field MAS.

A continuación se realiza una descripción de los agentes que componen al OilFieldMAS.

Agentes Unidades de Producción: son agentes que representan las unidades de producción que componen el campo. Se encargan de manejar la información sobre dichas unidades y controlar su comportamiento. Estos agentes pueden tomar los roles de Productor, Proveedor y/o Cliente dentro de la institución.

Los agentes Unidades de Producción disponen de una estructura común que define los objetivos, servicios, capacidades y restricciones de los que dispone el agente.

Cada agente definido para una unidad de producción se corresponde con la definición de dicha unidad en la ontología, por lo que sus atributos se corresponderán con los conceptos definidos en la misma.

En concreto, los agentes Unidades de Producción definidos dentro del OilFieldMAS para el caso de estudio se listan a continuación.

Agente Pozo: controla la operación de los pozos dentro del campo. Corresponde al concepto Pozo de la ontología.

Agente Estación de Flujo: controla la operación de las Estaciones de Flujo dentro del campo. Corresponde al concepto Estación de Flujo de la ontología.

Agente Suplidor de Energía: controla la operación de las plantas de generación de energía dentro del campo. Corresponde al concepto Planta de la ontología.

Agente Múltiple: controla la operación de los múltiples de gas y agua dentro del campo. Corresponde al concepto Múltiple de la ontología.

Agente Recolector: controla la operación de los patios de tanques dentro del campo. Corresponde al concepto Patio de Tanque dentro de la ontología.

Agentes de Servicio: son agentes que prestan servicios a las unidades de producción dentro del campo. Se han definido tres agentes en esta categoría:

Agente Mantenedor del Campo: es el agente encargado de realizar los mantenimientos requeridos por las unidades de producción. La estructura de este agente se describe en la siguiente tabla:

Agente Optimizador del Campo: este agente se encarga de calcular el escenario óptimo de producción para el campo.

Agente Gestor del Campo: es el encargado de garantizar que se cumpla la meta de producción del campo. Interactúa con el Agente Optimizador del Campo para realizar el cálculo del escenario óptimo de producción. Asigna las metas de producción y las cuotas de energía para cada unidad de producción dentro del campo.

Como paso siguiente para la implantación de la e-OilFieldInstitution, se establecieron las interacciones entre los agentes a través de las escenas y transiciones descritas en la estructura performativa definida en la sección 3. Así mismo se establecieron como normas de la institución las definidas en la misma sección.

Como resultado se obtuvo un mecanismo automatizado que, al disponer de la información requerida para conocer el estado del campo petrolero, permite automatizar la toma de decisiones que garantiza cumplir con la meta de producción del campo. Los resultados de experimentos realizados con la e-OilFieldInstitution pueden encontrarse en (Bravo, *et. al.*, 2011).

6. Conclusión

En el presente trabajo se propone una Arquitectura de Referencia para Integración de Procesos de Producción, mediante la cual es posible acceder a toda la información requerida para conocer el estado del proceso productivo, realizar la interpretación de dicha información, en el marco de la automatización de los flujos de trabajo de la empresa, para la toma de decisiones y la ejecución de acciones automática, mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial distribuida.

Dentro de la arquitectura propuesta, se definió una Capa de Conectividad que permite, a través de adaptadores de software y de la estandarización de los mecanismos de acceso a datos, recolectar la información sobre el proceso productivo, almacenada en distintas fuentes. Dicha capa establece un mecanismo unificado de acceso a datos, que permite disponer de toda la información requerida para la toma de decisiones, de manera oportuna y confiable.

La arquitectura contiene también una Capa de Semántica, cuya función es establecer un marco ontológico que permita

garantizar la comunicación efectiva entre las aplicaciones, fuentes de datos y humanos, que forman parte del proceso productivo. La Capa de Semántica se compone de cuatro elementos fundamentales: la Meta Data, la cual permite definir el origen y la ubicación de la información; el Meta-modelo de datos, que permite estandarizar la forma como se construyen los conceptos dentro de las ontologías de la empresa; las Ontologías de Carácter General, que permiten que se reutilicen conceptos definidos en otras ontologías desarrolladas en la comunidad científica e industrial; y los Conceptos de Domino Específico, que son los conjuntos de conceptos de la ontología pertenecientes a un proceso productivo particular. El aporte fundamental de la Capa de Semántica es el Meta-modelo de datos, ya que el mismo establece una estructura genérica para la construcción de conceptos del área de producción industrial, basándose en los modelos PROSA y PRODML, a través del cual se simplifica la búsqueda y análisis de la información representada en la ontología.

Como última capa de la arquitectura, se define la Capa de Gestión, en la cual se automatizan los flujos de trabajo correspondientes a los procesos de planificación y ejecución de la producción, mediante el uso de Instituciones Electrónicas. Las Instituciones Electrónicas permiten utilizar las ventajas de la inteligencia artificial distribuida que poseen los Sistemas Multiagentes, garantizando el cumplimiento de los objetivos planteados mediante la imposición de reglas sociales que norman el comportamiento de los agentes. Para el caso de producción industrial estudiado, se definen normas que acotan los tiempos de respuesta de los agentes, ya que las restricciones de tiempo son críticas en este tipo de procesos.

English Summary

Distributed Artificial Intelligence based Architecture applied to the Integrated Industrial Production Management.

This proposal consists in reference architecture for the integrated production management, which allows the access to the required information about the state of the productive process and the development of the business processes' intelligent automation. This architecture is composed by a standardized production information access schema, an ontological framework and a business processes automation mechanism, based on distributed artificial intelligence techniques, specifically multi-agent systems and electronic institutions. *Copyright © 2011 CEA.*

Keywords:

Industrial Automation, Intelligent Agents, Intelligent Manufacturing Systems, Intelligent Knowledge Based Systems, Intelligent Control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el PCP Automatización Integrada de Procesos de Producción, según el proyecto No. 200500380; y por el CDCHTA-ULA, según el proyecto No. I-1206-09-02-B.

Referencias

- Arcos, Josep Lluís, Marc Esteva, Pablo Noriega, Juan A. Rodríguez-Aguilar, Carles Sierra, 2005. An integrated developing environment for electronic institutions, Software Agent based Applications. Platforms and Development Kits: Birkhäuser Publisher, pp. 121 - 142.
- Bravo, C., 2010. Inteligencia Artificial Distribuida como Estrategia para la Gerencia Integrada de Producción Industrial. Tesis Doctoral. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Bravo, C., J. Aguilar, F. Rivas, y M. Cerrada, 2005. Design of an Architecture for Industrial Automation based on Multi-agents Systems. Proceedings of 16th IFAC World Congress. Prague, 2005.
- Bravo, C., J. Aguilar, A. Ríos, J. Aguilar-Martin, F. Rivas, 2008. A Generalized Data Meta-Model for Production Companies Ontology Definition. International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Vol. 2, No. 4, pp. 191-202.
- Bravo, C., Saputelli, L., Aguilar J., Ríos A., Rivas F. and Aguilar-Martin J, 2011. Automation of the Oilfield Asset via an Artificial Intelligence (AI)-Based Integrated Production Management Architecture (IPMA) Industrial. SPE Digital Energy Conference & Exhibition. The Woodlands, TX. USA.
- Chacón, E., Altamiranda, E., Colina, E, 2005. A Holonic Architecture for Continuous Processes Supervision and Coordination. WSEAS Transactions on Systems. Vol. 4, No. 7, pp. 941-944.
- Chacón E., Indriago M. Implementación de Supervisores en una Arquitectura de Referencia basada en Sistemas de Manufactura Holónica, 2010. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Vol 7. Num 3. pp 72-82.
- ENV 40 003, 1990. Computer Integrated Manufacturing - Systems Architecture - Framework for Enterprise Modelling CEN/CENELEC.
- Esteva, Marc, Juan Antonio Rodríguez, Carles Sierra, Pere García, y Josep Lluís Arcos, 2001. On the formal specifications of electronic institutions. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Agent-Mediated Electronic Commerce (The AgentLink Perspective). Frank Dignum and Carles Sierra Editors, 2001. 126-147.
- García-Camino, A., P. Noriega, and J.A. Rodríguez, 2005. Implementing Norms in Electronic Institutions. AAMAS'05. Utrecht, Netherlands, 2005.
- ISA, 1995. ANSI/ISA-88.01-1995 Batch Control Part 1: Models and Terminology (Formerly ANSI/ISA-S88.01-1995).
- ISA, 2000. ANSI/ISA-95.00.01-2000 Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology.
- ISO/OSI, 1994. Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 42: Integrated generic resources: Geometric and topological representation.
- Jennings, N., and S. Bussmann, 2003. Agent Based Control Systems. IEEE Control Systems Magazine.
- Litchicum, David, 2004. Next Generation Application Integration. From Simple Information to Web Services. Addison Wesley Information Technology Series.
- Marik, Vladimir, y Pavel Vrba, 2005. Simulation in Agent Based Control Systems: a MAST Case Study. 16th IFAC World Congress Proceedings. Prague.
- Noriega, Pablo, and Carles Sierra, 2002. Electronic institutions: Future trends and challenges. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Matthias Klusch, Sascha Ossowski and Onn Shehory (Eds.). pp 14-17.
- Olmheim, Jorn, Einar Landre, y Eileen Quale (2008). Improving Production by Use of Autonomous Systems. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition. Amsterdam.
- POSC, 2003-2006. WITSML Data Schema Overview.. www.energetics.org
- POSC, 2006. Reference Architecture PRODML 1.0. www.prodml.org.
- POSC, 2009. Integrated Operations in the High North. https://www.posccaesar.org/wiki/IOHN.
- PSLX Consortium, 2005. PSLX Consortium Planning & Scheduling Language on XML Specification. http://www.pslx.org/en/.
- Raskin, R., 2009. Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET). Jet Propulsion Laboratory. CalTech. Pasadena, CA. http://sweet.jpl.nasa.gov/sweet.
- Satter, Abdus, y Ganesh Thakur, 1994. Integrated Petroleum Reservoir Management. Tulsa: PennWell Books.
- Potters, H., y P. Kapteijn, 2005. Reservoir Surveillance and Smart Fields. International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar.
- Reddick, Chris, 2007. Field of the Future Program: Planning for Success. 2007 SPE Digital Energy Conference and Exhibition. Houston.
- Sierra, Carles, 2004. Electronics institutions: Methodology of multi-agent systems development. PRICAI 2004: Trends in Artificial Intelligence, 8th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence. Auckland: Chengqi Zhang, Hans W. Guesgen, and Wai-Kiang Yeap, editors.
- Sisk, Carl, Scott Fanty, y David Knox, 2007. Application of Field of the Future to BP's North American Gas Operations. 2007 SPE Digital Energy Conference and Exhibition. Houston.
- Soma, R., A. Bakshi, V. Prassanna, W. DaSie, y B. Bourgeois, 2008. Semantic Web Technologies for Smart Oilfield Applications. SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition. Amsterdam.
- The PABADIS Promise Consortium, 2002-2006. Benefits and requirements for the PABADIS Promise System. White Paper. Univ. of Magdeburg, Universitätsplatz 2.39106 Magdeburg – Germany. www.pabadis.org
- Williams, T. (Editor), 1989. A Reference Model For Computer Integrated Manufacturing (CIM). Instruments Society of America (ISA). North Carolina, USA.
- World Batch Forum, 2004. B2MML: Business to Manufacturing Markup Language. Releases Notes. June, 2004. www.wbf.org.
- Wyns, J., 1999. Architecture for Holonic Manufacturing Systems: The Key to Support Evolution and Reconfiguration. Leuven: K.P. Leuven PMA Division.
- Zhang, C., A. Orangi, A. Bakshi, W. Da Sie, y V.K. Prassana, 2006. Model-Based Framework for Oil Production Forecasting and Optimization: A Case Study in Integrated Asset Management. SPE Intelligent Energy Conference and Exhibition. Amsterdam.
- Zimmermann, H., 1980. OSI Reference Model: The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. IEEE Transactions on Communications, vol. 28, no. 4, pp. 425 – 432.