

Formalización de los componentes del Modelo Actor de Empresa (MADE)

DIANA JIMENA LÓPEZ¹
JUAN MARTÍN VELASCO²
ÓSCAR AMAURY ROJAS³

RESUMEN

El Modelo Actor de Empresa (MADE) es el producto de cinco años de investigación del grupo de investigación y desarrollo en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, Colombia. Se trata de un modelo de integración empresarial desarrollado específicamente para empresas del sector productivo. Su objetivo es representar la estructura, el comportamiento, la organización y la integración de los componentes de una empresa de producción, a la vez que establecer la información que fluye entre ellos. El lograr una aplicación exitosa de este modelo a una empresa de producción en particular se convertiría en un aporte trascendental en el campo de la automatización y la integración empresarial. En torno al MADE se ha desarrollado una serie de trabajos que ha permitido adicionar paulatinamente nuevas características, definiciones y conceptos; sin embargo, no se ha conseguido el grado de formalización requerido para iniciar el proceso de desarrollo de una metodología para su aplicación. Este artículo se centra en la formalización de los componentes actuales de MADE que dan como resultado tres elementos básicos de este: entidades, nomenclatura de las entidades y modelos.

Palabras clave: integración empresarial, automatización industrial, modelos de integración empresarial, sistemas multiagentes (SMA), metodologías para SMA.

¹ Magíster en Automática por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Ingeniera en Automática Industrial por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Docente ocasional del Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de esta misma universidad. Correo electrónico: djlopez@unicauca.edu.co

² Doctor en Ciencias de la Educación por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Magíster en Electrónica y Telecomunicaciones por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Magíster en Dirección Universitaria por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Ingeniero electrónico por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Docente del departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de esta misma universidad. Correo electrónico: jmvelasc@unicauca.edu.co

³ Doctorante en Ciencias Aplicadas por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería, especialista en Informática Industrial e ingeniero electrónico por la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Docente del Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control de esta misma universidad. Correo electrónico: orojas@unicauca.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 5 DE SEPTIEMBRE DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 7 DE ABRIL DEL 2014

Cómo citar este artículo: López, D.J., Velasco, J.M. y Rojas, Ó. A. (2014). Formalización de los componentes del Modelo Actor de Empresa (MADE). *Épsilon* (22), 11-38.

Formalizing the Components of the Enterprise Actor Model (MADE)

ABSTRACT

The Enterprise Actor Model (MADE) is the product of five years of research by the research group in development in Industrial Automation at the University of Cauca, Colombia. It is a model of enterprise integration developed specifically for production-sector businesses. It aims to represent the structure, behavior, organization and integration of the components of a production business, while establishing the information that flows among them. Achieving a successful application of this model to a particular production business would become a major contribution to the field of automation and enterprise integration. A series of works has developed around MADE that gradually allowed to add new features, definitions and concepts; however, the degree of formalization required to initiate the process of developing a methodology for implementation has not yet been achieved. This article focuses on formalizing the existing components of the Enterprise Actor Model which results in three basic elements of MADE: entities, nomenclature of entities, and models.

Keywords: enterprise integration, industrial automation, business integration models, multi-agent systems (MAS), methodologies for MAS.

Formalização dos componentes do Modelo Ator de Empresa (MADE)

RESUMO

O Modelo Ator de Empresa (MADE) é o produto de cinco anos de pesquisa do grupo de pesquisa e desenvolvimento em Automática Industrial da *Universidad del Cauca*, na Colômbia. Trata-se de um modelo de integração empresarial desenvolvido especificamente para empresas do setor produtivo. O seu objetivo é representar a estrutura, o comportamento, a organização e a integração dos componentes de uma empresa de produção, e ao mesmo tempo estabelecer a informação que flui entre eles. O fato de alcançar uma aplicação bem sucedida deste modelo numa empresa de produção em particular se transformaria em uma contribuição transcendental no campo da automatização e a integração empresarial. Em torno ao MADE se desenvolveu uma série de trabalhos que permitiu adicionar paulatinamente novas características, definições e conceitos; porém, não se conseguiu o grau de formalização requerido para iniciar o processo de desenvolvimento de uma metodologia para a sua aplicação. Este artigo se centraliza na formalização dos componentes atuais de MADE que dão como resultado três elementos básicos do MADE: entidades, nomenclatura das entidades e modelos.

Palavras chave: integração empresarial, automatização industrial, modelos de integração empresarial, sistemas multiagentes (SMA), metodologias para SMA.

Introducción

Con el propósito de enfrentar el reto de la integración total y la automatización de las empresas de manufactura, se han desarrollado, desde hace ya varios años, diferentes modelos que representan la estructura y el comportamiento de la empresa. Además, estos establecen los aspectos más importantes que deben considerarse durante el proceso de integración y automatización empresarial, como la información que fluye entre los diferentes componentes de la empresa y las relaciones existentes entre las áreas de apoyo, el proceso de producción y los sistemas de decisión (Rojas, 2008). Estos modelos se enfocan en los tres paradigmas reconocidos en los sistemas de producción: jerárquico, heterárquico y holárquico.

Los modelos que pertenecen al primer paradigma se caracterizan por tener una estructura jerárquica rígida que les impide reaccionar rápidamente ante variaciones (Vento, 2006). Los modelos heterárquicos se caracterizan por fragmentar el sistema de producción en unidades pequeñas y completamente autónomas, razón por la cual tienen buen desempeño ante cambios y pueden adaptarse continuamente al entorno (Pérez, 2006). Finalmente, en los modelos holárquicos existe también una fragmentación del sistema de producción. El elemento básico de una arquitectura basada en este paradigma es el holón. Un holón es un bloque de construcción de un sistema de manufactura que está en capacidad de controlarse a sí mismo y posee cierto grado de razonamiento local, capacidad de decisión, comportamiento autónomo y habilidad para comunicarse de manera interactiva con otros holones (Durán, 2006).

Entre los modelos de integración empresarial jerárquicos más relevantes reportados en la literatura se destacan: GRAI (Research Group of Industrial Automation) (Doumeingts, 1984); CIMOSA (Open System Architecture for CIM) (Vlietstra, 1991); PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) (Williams, 1989); modelo CIM propuesto por ingenieros de Siemens (Baumgartner y Knischewski, 1989); modelo CIM propuesto por la empresa IBM (García y Castillo, 2007); NIST-AMRF (NIST-Advanced Manufacturing Research Facility), propuesto por NIST (National Institute of Standards and Technology) (García y Castillo, 2007); y el modelo Y-CIM, propuesto por el grupo de investigación alemán DFKI (Deutsch Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, o Centro de Investigación Alemán en Inteligencia Artificial) (Scheer, 1991). Estos modelos clásicos se caracterizan porque los diferentes niveles que componen su estructura no tienen

capacidad para tomar la iniciativa; por tanto, son susceptibles a perturbaciones, y su autonomía y reactividad ante disturbios es bastante débil.

Dentro del paradigma heterárquico se encuentran los siguientes modelos: PROHA (Product Resource Order Heterarchical Architecture) (Cejor *et al.*, 2007); RETSINA (Reusable Environment for Task-Structured Intelligent Network Agents) (Sy-cara, 1998); PABADIS (Plant Automation Based on Distributed Systems) (Lüder *et al.*, 2004), y su versión mejorada: PABADIS-PROMISE (PABADIS-PRoduct Oriented Manufacturing Systems for Re-Configurable Enterprises) (Lüder *et al.*, 2008). Estos modelos heterárquicos se basan en una total autonomía local (control distribuido), lo que resulta en un entorno donde todos los componentes autónomos cooperan entre sí a través de protocolos de negociación.

Finalmente, dentro del paradigma holárquico se encuentran estos modelos: MRAI (Modelo Referencial de Automatización Industrial) (Chacón *et al.*, 1996); 3D-EBM (Modelo de 3 Dimensiones del Negocio de la Empresa) (Chacón *et al.*, 2001); ADACOR (Adaptative Holonic control Architecture) (Leitao, 2004); y PROSA (Process Resource Order Staff Architecture) (Wyns, 1998). En estos modelos se reconoce una unidad autónoma denominada *holón*. Cada holón puede ser considerado un todo o una parte, según la perspectiva que se utilice. Esta forma de organización de los holones se denomina *holarquía* y permite mejorar el nivel de reacción a disturbios, al igual que implementar políticas claras de optimización del proceso.

Conforme se van desarrollando modelos de automatización e integración empresarial, surge la necesidad de diseñar metodologías que guíen y acompañen su proceso de aplicación. La primera metodología reportada en la literatura aparece en 1988; fue desarrollada en Francia en el laboratorio LAP (Laboratory for Automation and Production) de la Universidad de Bordeaux, y fue denominada GIM (GRAI Integrated Methodology) (Doumeingts y Zanettin, 1992). Esta metodología permite la aplicación del modelo de referencia conceptual GRAI. En 1994, los doctores Bernus y Nemes proponen GERAM (Generic Enterprise Reference Architecture and Methodology) (Williams, 1994), metodología que se basa en el concepto de PERA, GRAI-GIM y CIMOSA. Por esta razón, se califica como una arquitectura que recoge todo el conocimiento necesario para la integración de una empresa. GERAM no solo propone una arquitectura genérica, sino que define una metodología para el modelamiento empresarial soportado en EET (Enterprise Engineering Tools).

El grupo de investigación y desarrollo en Automática Industrial de la Universidad del Cauca no podría ser ajeno a los avances investigativos en las áreas de la automatización y la integración empresarial, por lo cual ha realizado dos importantes aportes en este campo: el modelo CIM-FIET (Gómez y Manquillo, 2007) y el más reciente, el Modelo Actor de Empresa (MADE) (Hernández y Viveros, 2008).

El MADE nace con el propósito de establecer un patrón que represente, de forma integral y sistemática, la estructura e integración de los componentes de una empresa de manufactura, lo cual facilita, en gran medida, el proceso de automatización empresarial. El MADE es una importante contribución al área de la automática industrial, ya que su fundamento se diferencia de los modelos tradicionales mencionados, al incluir tanto *software* como *hardware* de ejecución. Es importante aclarar que la gran mayoría de modelos desarrollados hasta el momento, exceptuando los holones, se basan, o bien, en el diseño *software*, tal como los relacionados con los sistemas multiagentes; o bien, se fundamentan en el campo informático. Otra ventaja de este modelo es que al basarse en la estructura y la acción del ser humano, permite una implementación tanto de procesos automáticos como no automáticos.

Actualmente, el MADE, aunque permite especificar de una manera integral y sistemática las diferentes funciones de una empresa, no cuenta con una metodología que posibilite aplicarlo. Disponer de una herramienta conceptual de este tipo facilitaría la prueba y la posterior implementación del modelo en empresas de manufactura de cualquier tamaño y grado de automatización. Uno de los primeros pasos previos al desarrollo de la metodología de aplicación del modelo es la formalización de sus componentes. Hoy en día se tiene un compendio de definiciones, conceptos, actividades y elementos que se han agregado al MADE conforme avanza la investigación; sin embargo, no se ha logrado la formalidad necesaria para iniciar el proceso de desarrollo de la metodología.

Este artículo presenta, de manera general, los principales conceptos del MADE: su comportamiento, principios básicos y definiciones; posteriormente, se muestra el proceso de formalización de sus componentes y se finaliza con las conclusiones al respecto.

Actor de empresa

El propósito del MADE es abstraer el funcionamiento de una empresa de manufactura, que se referencia, en el comportamiento humano, tanto en términos de estructura como de funcionalidad; por tanto, este modelo pretende representar la empresa como un entorno de cooperación entre humanos que conforman una sociedad. Los esquemas básicos de referencia son ilustrados en la figuras 1a y 1b.

El esquema de la acción humana (figura 1a) representa el conocimiento de sí mismo y del entorno. Parte de una sensación producto de una situación específica, la cual es impulsada por la emoción para lograr que la estructura humana actúe (Hernández y Viveros, 2008).

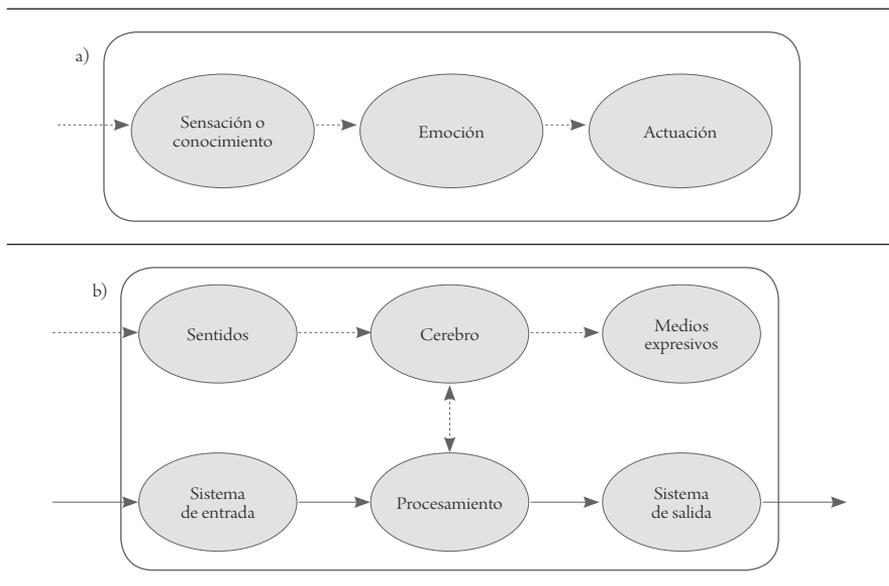


Figura 1. Esquemas básicos para el desarrollo de MADE (a: acción humana; b: estructura humana)

Fuente: Lozada (2010).

Por su parte, el esquema de la estructura humana de la figura 1b hace referencia al procesamiento físico y de información en el ser humano. Los sentidos forman parte del sistema de control; a través de ellos se perciben las señales de entrada provenientes del entorno. El cerebro es el medio controlador y planificador: ingresa las señales de entrada, las procesa, toma decisiones y las envía a los medios expresivos, los cuales interactúan con el exterior.

El sistema de entrada es el inicio de la parte física de la estructura humana. Este se encarga de tomar los insumos que requiere el cuerpo humano para funcionar correctamente. Una vez entran al cuerpo humano, son procesados para obtener nutrientes, defensas y residuos o desechos que son evacuados por el sistema de salida. Todas estas acciones son controladas por el cerebro (Guevara, 2010).

Partiendo de la hipótesis de que toda empresa de manufactura —y cada parte de esta— puede ser modelada a partir de los esquemas anteriores, se presenta el esquema del actor de empresa (ADE) en la figura 2. Allí se aprecian dos tipos de flujo: el flujo físico (líneas continuas) y el flujo de información (líneas punteadas). El flujo físico representa la secuencia que transforma la materia prima y los insumos en productos y residuos al realizar un proceso. El flujo de información representa el intercambio de información que hace posible el control del flujo físico, es decir, la secuencia del proceso (Hernández y Viveros, 2008):

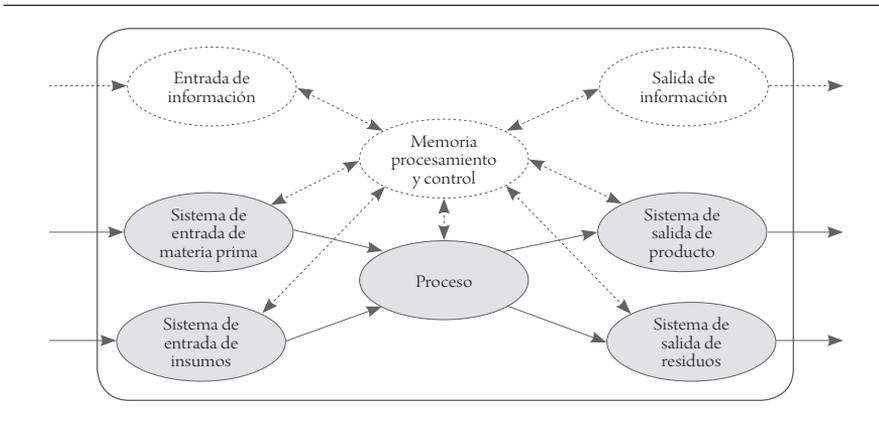


Figura. 2. Esquema del actor de empresa (ADE)

Fuente: Lozada (2010).

El modelo para la integración empresarial del MADE estará constituido, entonces, mediante la unión de varios ADE, conformando una red. Cada ADE desempeña un papel determinado, asociado a una función específica dentro de la empresa.

Características fundamentales del MADE

Para determinar el comportamiento individual de un ADE, se tiene un elemento denominado *modelo de comportamiento de ADE*, que es básicamente un diagrama

de flujo con siete secciones, a partir del cual se puede modelar una función empresarial. La descripción detallada de este modelo se presenta en López, Velasco y Rojas (2010).

Aunque este modelo de comportamiento describe de manera adecuada las acciones que es capaz de realizar un ADE, no especifica el modo de actuación ante errores o bloqueos, y carece de formalismo. Por ello, se realizó una comparación entre diferentes herramientas diseñadas para lograr un modelado dinámico y seleccionar una que permitiera una reestructuración del modelo de comportamiento actual. Las herramientas seleccionadas para realizar la comparación son: Grafcet (Balcells y Romeral, 1997), autómatas finitos (García, 1996), UML (Unified Modeling Language) (Olivé y Gómez, 2003) y redes de Petri (Sosa, 1998). Cada herramienta fue analizada de acuerdo con los siguientes criterios: formalismo matemático, herramientas de análisis y campo de aplicación. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Herramientas para el modelado dinámico

HERRAMIENTA \ CRITERIOS	FORMALISMO MATEMÁTICO	HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS	CAMPO DE APLICACIÓN
Grafcet	No	Interfaz gráfica	Modelado de procesos industriales
Autómatas finitos	Sí	Interfaz gráfica y matemática	Ciencias de la computación
UML	No	Interfaz gráfica	Ciencias de la computación
Redes de Petri	Sí	Interfaz gráfica y matemática	Sistemas empresariales y ciencias de la computación

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se optó por utilizar los conceptos de las redes de Petri para realizar un nuevo modelo de comportamiento. Estas redes manejan formalismos matemáticos, y en la actualidad existen diversas herramientas de soporte para su comprobación.

Adicionalmente, este formalismo es considerado una herramienta para el estudio de sistemas en eventos discretos, ya sean de tipo concurrente, asíncrono, distribuido o no determinístico. Comparadas con otros modelos de comportamiento dinámico gráfico, como los diagramas de máquinas de estado finitos, las redes de Petri ofrecen una forma de expresar procesos que requieren sincronía y, quizás lo

más importante, pueden ser analizadas de manera formal y obtener información del comportamiento dinámico del sistema modelado.

Un modelo de comportamiento de ADE ejecuta un instructivo de ADE, el cual posee todo el conocimiento que este debe tener: objetivos que debe cumplir, señales de información de entrada requeridas para el cumplimiento de cada objetivo, señales de información de salida producto del cumplimiento de cada objetivo, tareas por ejecutar, señales de activación, los ADE de origen y los ADE de destino (Lozada, 2010).

Una empresa de fabricación puede ser modelada a través de 88 ADE que se comunican entre sí. Estos ADE están basados en los subámbitos del modelo Siemens-FIET (Gómez y Manquillo, 2007). Las funciones que cumple cada subámbito son los objetivos individuales programados para cada ADE. La selección de los ADE que van a modelar una empresa específica no está atada a la cantidad sugerida por el modelo, sino que se pueden seleccionar los ADE que mejor se ajusten a los procesos empresariales, y agregar o quitar los objetivos individuales según convenga. Esta es una de las principales ventajas de este modelo, ya que al ser modular, puede adaptarse a empresas de cualquier tamaño y sin importar su grado de automatización.

Los ADE se asocian en *organizaciones de los ADE*, las cuales cumplen objetivos generales. Para desplegar un objetivo general es necesaria la ejecución sistemática de un conjunto de objetivos individuales. Para llevar a cabo un objetivo individual, se debe realizar, en orden, un conjunto de tareas que dependen específicamente de la empresa en particular que se esté modelando. Al existir el elemento *organización de los ADE*, es necesario un modelo de comportamiento de organización, el cual ejecuta un instructivo de organización. El modelo de comportamiento de organización asegura el cumplimiento del objetivo general que fue programado a través del uso de la información consignada en el instructivo de organización.

El modelo de comportamiento de organización propuesto, desarrollado a través de la herramienta *redes de Petri*, consta de siete estados y catorce transiciones, tal como se muestra en la figura 3 y se especifica en las tablas 2 y 3.

La figura 3 muestra todos los estados por los que puede pasar una organización: inhabilitada, habilitada, disponible, preparada, ocupada, ejecutada, desocupada y finalizada. El modelo de comportamiento de ADE tiene una forma similar: solo hay que variar los términos *organización por ADE*, y *objetivo general por objetivo individual*.

Tabla 2. Lugares del modelo de comportamiento de organización

ID	NOMBRE
P0	Organización inhabilitada
P1	Organización habilitada
P2	Organización disponible
P3	Organización preparada
P4	Organización ocupada
P5	Organización ejecutada
P6	Organización desocupada
P7	Organización finalizada

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Transiciones del modelo de comportamiento de organización

ID	NOMBRE
T0	Recibir el instructivo de organización
T1	Recibir las señales de información de entrada
T2	Habilitar la señal de activación por señales de información de entrada
T3	Cumplir el objetivo general
T4	Entregar las señales de información de salida
T5	Habilitar la señal de activación por señales de información de salida
T6	Habilitar la señal de activación por objetivo
T7	Deshabilitar las señales de activación
T8	No recibir el instructivo, $t > t$ límite
T9	No recibir las señales de información de entrada, $t > t$ límite
T10	No habilitar la señal de activación por señales de información de entrada
T11	No cumplir el objetivo general, $t > t$ límite
T12	No entregar las señales de información de salida, $t > t$ límite
T13	No habilitar la señal de activación por señales de información de salida
T14	No habilitar la señal de activación por objetivo

Fuente: elaboración propia.

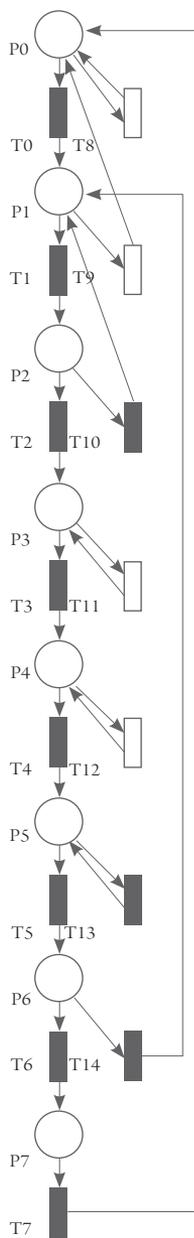


Figura. 3. Modelo de comportamiento de organización

Fuente: elaboración propia.

Proceso de formalización de componentes del MADE

Este proceso consta de tres pasos:

1. Selección de una metodología existente para ser usada como referencia análoga.
2. Estudio de los conceptos básicos de la metodología seleccionada.
3. Adaptación de los conceptos estudiados al MADE.

El proceso de formalización inicia con la selección de una metodología existente para ser usada como referencia análoga. A través de estudios previos, se concluye que los resultados de la metodología Anemona (Giret, 2005) dan la posibilidad de utilizar como base una metodología de sistema multiagente (SMA), para definir una metodología de aplicación de un modelo basado en un paradigma diferente al heterárquico. Este hecho llevó a plantear la hipótesis de tomar como base la metodología para SMA Ingenias (Gómez, 2002).

Con la metodología seleccionada, se prosigue con el estudio de sus elementos básicos. Ingenias (Ingeniería de Agentes Software) ofrece varias ventajas que la hacen superior a otras metodologías para SMA: es una metodología orientada a agentes y combina los resultados de investigación de los SMA y los métodos establecidos en la metodología Message (Methodology for Engineering Systems of Software Agents) (Caire, Gómez y Pavón, 2001); y proporciona las propiedades y comportamientos dinámicos requeridos para el modelado empresarial, ya que concibe los SMA como la representación computacional de un conjunto de modelos que incorporan características de autonomía, racionalidad, adaptabilidad, etc.

Cada uno de estos modelos muestra una visión parcial del SMA: los agentes que lo componen, las interacciones que existen entre ellos, cómo se organizan para proporcionar la funcionalidad del sistema, qué motivaciones tienen y cómo es el entorno en que se ubica el sistema por desarrollar. Estas características de Ingenias resultan bastante apropiadas para ser adecuadas al MADE.

Aunque estas características resultan de gran interés para ser usadas como referencia en el proceso de formalización de los componentes del MADE, es necesario estudiar las ventajas y desventajas de otras metodologías SMA, para dar soporte a la decisión tomada. Dentro de la investigación realizada, se estudiaron los aspectos relevantes de las siguientes metodologías: Vowel-Engineering (Wood y Sparkman, 2000); MAS-CommonKADS (Iglesias y Garijo, 1998); BDI (Kinny y Georgeff, 1995); MaSE

(DeLoach y Scott, 2001); Zeus (Wood y DeLoach, 2001); GAIA (Wooldridge y Jennings, 2000), y Message. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Comparación de metodologías SMA

METODOLOGÍA	ENFOQUE	MODELOS	PLATAFORMA DE DESARROLLO	VENTAJAS/DESVENTAJAS
Vowel-Engineering	Orientado a agentes	Agente, entorno y organización-interacción	Volcano	<p>Visión del modelado de sistemas como composición de elementos (facilita la reutilización de código)</p> <p>Faltan herramientas de soporte</p> <p>Falta descripción de los aspectos considerados por esta metodología</p>
MAS-CommonKADS	Orientado a conocimiento	Agente, organización-interacción y tareas	No tiene herramienta de soporte específica	<p>El nivel alcanzado en la descripción de esta metodología no se puede alcanzar sin una herramienta de apoyo</p> <p>Es una metodología que propone una lista detallada de elementos, por lo que el programador debe seguir la lista de forma manual, lo cual es muy costoso y propenso a errores</p>
BDI	Orientado a agentes	Agente, interacción, objetivos y creencia	No tiene herramienta de soporte específica	<p>Es la única arquitectura que se inspira en el modelo cognitivo del ser humano</p> <p>Presenta muchas restricciones: los eventos se responden en su momento, las creencias han de ser consistentes, etc.</p> <p>Faltan más detalles de cómo llevar a cabo esta arquitectura</p>
MaSE	Orientado a objetos	Agentes, interacción	AgentTool	<p>Herramienta de fácil manejo</p> <p>No hay claridad en la dependencia de los diagramas propuestos, lo que dificulta saber qué máquina de estado define la ejecución de las tareas</p>
Zeus	Orientado a agentes	Agente, organización y roles	Zeus	<p>Provee un entorno integrado para el desarrollo rápido de sistemas</p> <p>Falta de información del orden de las tareas, de la definición de las ontologías y de las dependencias sociales</p>
GAIA	Orientado a agentes	Agentes, interacciones y roles	No tiene herramienta de soporte específica	<p>Permanece en un sistema de abstracción demasiado alto</p> <p>Omite dependencias entre los modelos propuestos, lo cual es fundamental a la hora de proponer un proceso</p>

Continúa

METODOLOGÍA	ENFOQUE	MODELOS	PLATAFORMA DE DESARROLLO	VENTAJAS/DESVENTAJAS
Message	Orientado a objetos	Agentes, organización, interacción y objetivos	UML	Es la primera metodología en utilizar una herramienta para soporte del proceso de especificación de SMA de forma visual Ignora lo que rodea la aplicación (modelo de entorno)
Ingenias	Orientado a agentes	Agente, organización, tareas y objetivos, interacción y entorno	Ingenias IDK	Plantea transformaciones de entidades conceptuales en entidades computacionales para completar la generación del SMA Proceso de generación de código más flexible Implementación sobre distintos tipos de plataforma Permite desarrollar procesos robustos y probados en escenarios reales Proceso de desarrollo excesivo si se trata de aplicaciones reducidas

Fuente: elaboración propia.

A partir de la investigación realizada, se confirma que Ingenias es la metodología apropiada para lograr los propósitos de este proyecto, ya que a pesar de ser una metodología *software* orientada específicamente a agentes y de haber sido aplicada de manera exitosa en investigaciones relacionadas con este concepto (Soto, 2005; Gómez y Fernández, 2007), ha demostrado ser útil para otro tipo de aplicaciones.

Dentro del grupo de investigación y desarrollo de Automática Industrial de la Universidad del Cauca, se han desarrollado cuatro importantes proyectos, cuyo objetivo principal es la obtención de un modelo dinámico para el proceso de programación y control de la producción, la planificación de la producción, el proceso de control de la fabricación en la manufactura asistida por computador y el control estadístico de la calidad; todos ellos aplicando los conceptos de la metodología Ingenias (Mora y Mosquera, 2010; Moncayo y Girón, 2010; Moreno y Alvarado, 2010; Rivera y Thola, 2010). Estos proyectos entregaron excelentes resultados y proporcionaron un impulso para continuar con la investigación, la aplicación y el uso de Ingenias en el área de la automatización e integración empresarial.

Con el estudio de los elementos de Ingenias y las metodologías para SMA restantes se determina que todos tienen en común la existencia de entidades o componentes básicos que permiten crear relaciones y asociaciones. Estas entidades cuentan con una nomenclatura adecuada que permite su identificación cuando requieren ser utilizadas. Además, las relaciones entre entidades están representadas gráficamente, de tal modo que se facilite el diseño y la implementación a través de *software*. Con esta información se da inicio a la adaptación al MADE de los elementos estudiados.

Las definiciones y los conceptos del MADE se resumen en el elemento *entidades del MADE*; las relaciones y presentaciones gráficas se reúnen en el elemento *modelos del MADE*. A estos dos elementos se adiciona una *nomenclatura de las entidades del MADE*, que facilita la designación de los nombres a las entidades, cuando se esté modelando una empresa de producción desde este esquema.

Entidades del MADE

Dentro del MADE se reconocen múltiples entidades que fueron tomadas de los conceptos y definiciones mostradas en tabla 5.

Tabla 5. Entidades del MADE

COMPONENTE	DEFINICIÓN
ADE	Unidad mínima del MADE, capaz de cumplir objetivos individuales programados, a través de la realización de tareas secuenciales. Para lograr el cumplimiento de cada objetivo individual, requiere de señales de información de entrada, las cuales se utilizan, transforman y entregan como señales de información de salida.
Organización de los ADE	Conjunto de varios ADE organizados, capaz de cumplir un objetivo general, a través del cumplimiento ordenado de objetivos individuales.
Objetivo individual	Meta programada para un ADE; el logro de esta meta está determinado por el desarrollo secuencial de tareas.
Objetivo general	Meta programada para una organización de varios ADE; el logro de esta meta está determinado por el desarrollo secuencial de objetivos individuales.
Tarea	Cada una de las actividades que deben ser ejecutadas de forma ordenada por un ADE para el cumplimiento de un objetivo individual. Estas tareas son propias de la empresa de producción que se esté modelando.
Resultado de tarea	Señal que se obtiene al finalizar cada una de las tareas en un modelo de comportamiento de ADE, la cual indica que la tarea se cumplió conforme con lo esperado.

Continúa

COMPONENTE	DEFINICIÓN
Resultado de objetivo individual	Señal que se obtiene al finalizar cada uno de los objetivos individuales en un modelo de comportamiento de organización, la cual indica que el objetivo individual se cumplió conforme con lo esperado.
Flujo de trabajo del ADE	Orden en que deben cumplirse los objetivos individuales dentro de un ADE. Este orden es importante, ya que un ADE puede comunicarse consigo mismo y requerir el resultado de cumplimiento de un objetivo individual ejecutado dentro de sí mismo.
Flujo de trabajo individual	Orden en que deben ejecutarse las tareas que llevan al cumplimiento de un objetivo individual.
Flujo de trabajo general	Orden en que deben ejecutarse los objetivos individuales que llevan al cumplimiento de un objetivo general.
Interacción	Paso de información desde un ADE origen a un ADE destino.
Estado	Cada una de las etapas en las que puede estar un ADE o una organización de varios ADE (inhabilitado, habilitado, disponible, preparado, ocupado, ejecutado, desocupado, finalizado).
Señal de activación por información de entrada	Indicación que se habilita al recibir todas las señales de información de entrada requeridas para el cumplimiento de un objetivo individual en un ADE.
Señal de activación por información de salida	Indicación que se habilita al entregar todas las señales de información de salida, producto del cumplimiento de un objetivo individual en un ADE.
Señal de activación por objetivo	Indicación que se habilita al cumplirse todos los objetivos individuales programados para un ADE específico.
Modelo de comportamiento de ADE	Modelo que asegura el cumplimiento de los objetivos individuales programados para el ADE, a través de la evolución de sus estados.
Modelo de comportamiento de organización	Modelo que asegura el cumplimiento del objetivo general programado para la organización de varios ADE, a través de la evolución de sus estados.
Instructivo de ADE	Listas que contienen la información necesaria para que el ADE actúe.
Instructivo de organización	Listas que contienen la información necesaria para que la organización de varios ADE actúe.

Fuente: elaboración propia.

Notación de las entidades del MADE

La notación propuesta facilita la designación de los nombres a las entidades, cuando se esté modelando una empresa de producción desde este esquema, y se presenta en la tabla 6.

La organización de los ADE, A_i , cumple un objetivo general, O_i , y tiene asociado un modelo de comportamiento de organización, M_i , el cual ejecuta el instructivo

Tabla 6. Notación de las entidades del MADE

ENTIDAD	NOMENCLATURA
Organización de los ADE	$A_1 \dots A_n$
ADE	$A_{1-1} \dots A_{n-m}$
Objetivo general	$O_1 \dots O_n$
Objetivo individual	$O_{1-1-1} \dots O_{n-m-j}$
Resultado de objetivo individual	$Re_{1-1-1} \dots Re_{n-m-j}$
Tarea	$T_{1-1-1-1} \dots T_{n-m-j-i}$
Resultado de tarea	$Re_{1-1-1-1} \dots Re_{n-m-j-i}$
Información de entrada o salida	$E_1 \dots E_k$
Modelo de comportamiento de ADE	$M_{1-1} \dots M_{n-m}$
Modelo de comportamiento de organización	$M_1 \dots M_n$
Instructivo de ADE	$I_{1-1} \dots I_{n-m}$
Instructivo de organización	$I_1 \dots I_n$
Señal de activación por señal de información de entrada, por señal de información de salida o por objetivo	$ACT_{1-1} \dots ACT_p$

Fuente: elaboración propia.

de organización, I_1 . A_1 está compuesta por los ADE $\{A_{1-1} \dots A_{1-m}\}$; cada ADE tiene asociado un modelo de comportamiento de ADE: $\{M_{1-1} \dots M_{1-m}\}$, que ejecuta el instructivo de ADE $\{I_{1-1} \dots I_{1-m}\}$ y se encarga de cumplir los objetivos individuales: $\{O_{1-1-1} \dots O_{1-m-j}\}$. Para cumplir cada uno de esos objetivos, se requiere la realización de las tareas $\{T_{1-1-1-1} \dots T_{1-m-j-i}\}$ que se organizan en un flujo de trabajo individual y tienen asociados los resultados $\{Re_{1-1-1-1} \dots Re_{1-m-j-i}\}$. Producto de esta acción se obtiene una señal de información de salida $\{E_1 \dots E_k\}$. Los objetivos individuales se organizan en un flujo de trabajo grupal, que lleva a la consecución del objetivo general.

Modelos del MADE

El MADE se concibe como la representación de un conjunto de modelos. Cada uno de ellos muestra una vista diferente del modelo: los actores que lo componen, las relaciones que existen entre ellos, cómo se organizan, qué información intercambian y cómo es el entorno donde se ubican. Estos modelos están orientados a la generación de representaciones visuales de aspectos concretos del sistema. Para

el MADE se definen cinco modelos representados en la herramienta UML, cuyos nombres fueron inspirados en los metamodelos definidos para Ingenias:

- 1) Modelo de ADE.
- 2) Modelo de tareas y objetivos.
- 3) Modelo de interacción.
- 4) Modelo de entorno.
- 5) Modelo de organización.

A continuación se detalla cada uno de los cinco modelos definidos para el MADE.

Modelo de ADE

El modelo de ADE, representado en la figura 4, se usa para describir cada uno de los ADE en particular, excluyendo su interacción con otros ADE. Además, muestra su responsabilidad y comportamiento, entendiéndose por *responsabilidad* los objetivos individuales que se compromete alcanzar y por *comportamiento* los mecanismos que aseguran la ejecución de los objetivos planteados y la evolución de sus diferentes estados. Cada ADE tiene un nombre y un identificador único, y cumple uno o varios objetivos individuales, los cuales deben ser ejecutados en un orden denominado (flujo de trabajo del ADE).

Cada ADE tiene asociado un modelo de comportamiento de ADE, que asegura el cumplimiento de los objetivos individuales planteados e informa sobre cada uno de sus estados. Para que el modelo de comportamiento de ADE cumpla su función, se requiere de un instructivo de ADE que contenga la información necesaria. Cada modelo de comportamiento tiene un nombre y un identificador relacionado con el ADE modelado.

Modelo de interacción

Las interacciones hacen referencia a la entrega o recepción de información. Este modelo, representado en la figura 5, se usa para expresar la interacción entre las distintas entidades del sistema, que para el caso de MADE son *ADE* y *organización de los ADE*. Un ADE puede comunicarse consigo mismo y con otros para recibir y entregar información; por tanto, un ADE puede ser de origen o de destino. De igual manera, un ADE puede comunicarse con una organización de varios ADE para recibir y entregar información.

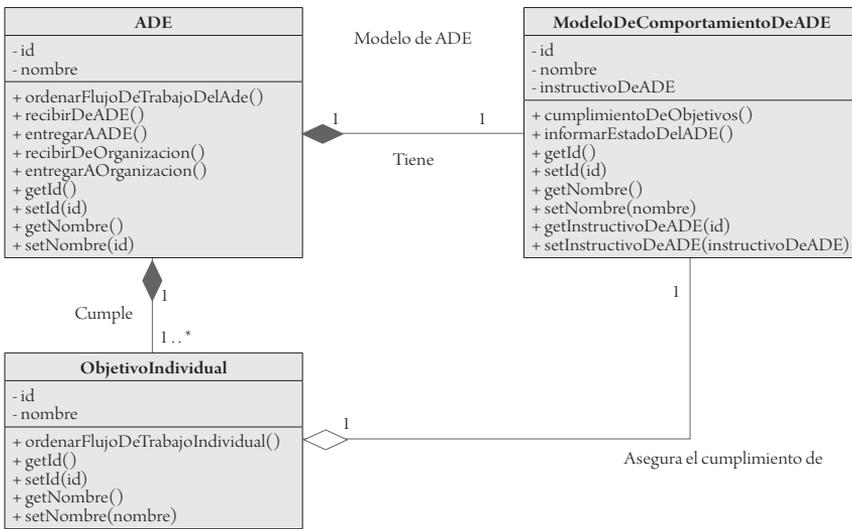


Figura 4. Modelo de ADE

Fuente: elaboración propia.

Dentro del MADE no está contemplado que una organización de varios ADE se comunique consigo misma, pero sí con otras organizaciones para recibir o entregar información. La importancia de este modelo radica en que se puede expresar la dinámica del sistema de fabricación por modelar sin tener en cuenta detalles del ADE, como los objetivos individuales que se deban cumplir o las diferentes tareas por ejecutar.

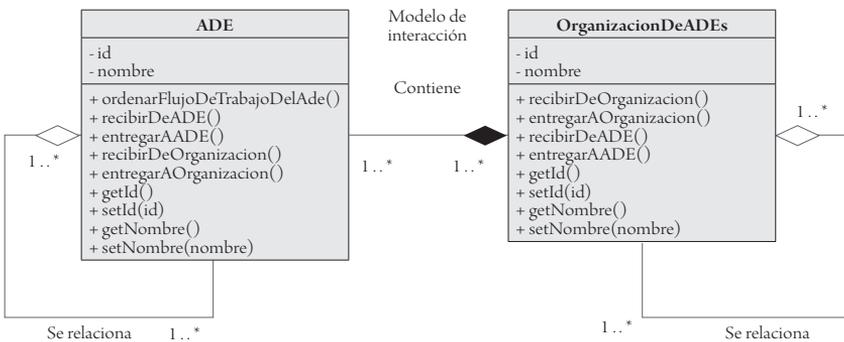


Figura 5. Modelo de interacción

Fuente: elaboración propia.

Modelo de tareas y objetivos

El modelo de tareas y objetivos, representado en la figura 6, busca la asociación de tareas a objetivos individuales y de objetivos individuales a un objetivo general. Para el desarrollo de cada objetivo individual, se debe ejecutar un grupo de tareas ordenadas en un flujo de trabajo individual. Estas tareas tienen un nombre y un identificador, y son propias de la empresa de producción que se esté modelando.

Por su parte, una organización tiene un único objetivo general, cuyo cumplimiento se basa en la ejecución de cada uno de los objetivos individuales. La ejecución de los objetivos individuales debe ser llevada a cabo en un determinado orden que constituye un flujo de trabajo grupal.

Modelo de entorno

El modelo de entorno, representado en la figura 7, se centra en la percepción y actuación de los ADE. Para el MADE, el entorno son todos los elementos que el ADE percibe y utiliza para actuar; como resultado de su actuación, se obtienen otros elementos que son devueltos al entorno. La inicialización de un objetivo individual depende de la información que obtiene del entorno, la cual es utilizada, transformada y regresada al entorno para ser utilizada por otro o por el mismo ADE; por tanto, la información del entorno puede ser de dos tipos: entrada o salida.

Modelo de organización

El modelo de organización, representado en la figura 8, hace referencia a la descripción estructural, funcional y social de la organización de los ADE. Una organización de varios ADE cumple un objetivo general; para ello, cada ADE debe desarrollar su objetivo individual en un orden determinado por un flujo de trabajo grupal.

Cada organización de los ADE tiene asociado un modelo de comportamiento de organización, el cual asegura el cumplimiento del objetivo general e informa sobre cada uno de los estados de la organización. Para que el modelo de comportamiento de organización cumpla su función, se requiere de un instructivo de organización que contenga la información necesaria. Cada modelo de comportamiento de organización tiene un nombre y un identificador relacionado con la organización modelada.

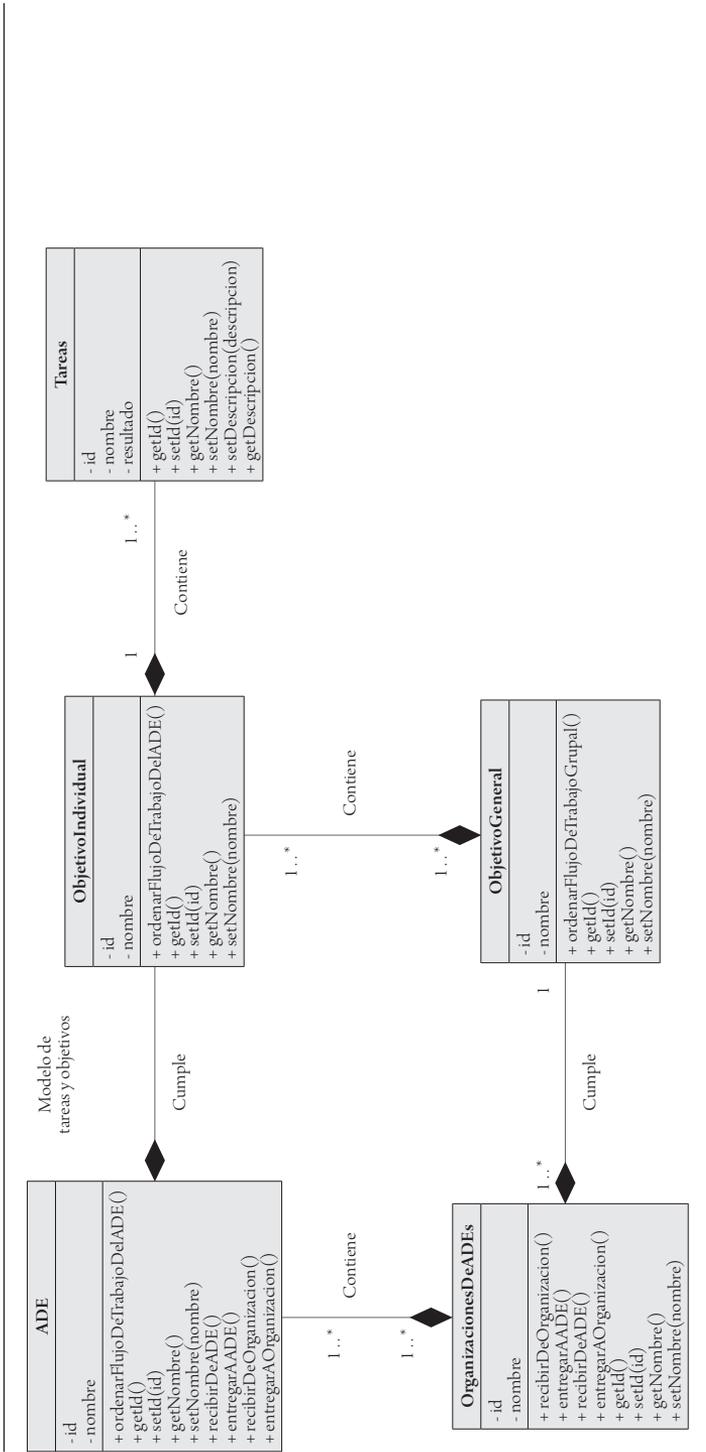


Figura 6. Modelo de tareas y objetivos

Fuente: elaboración propia.

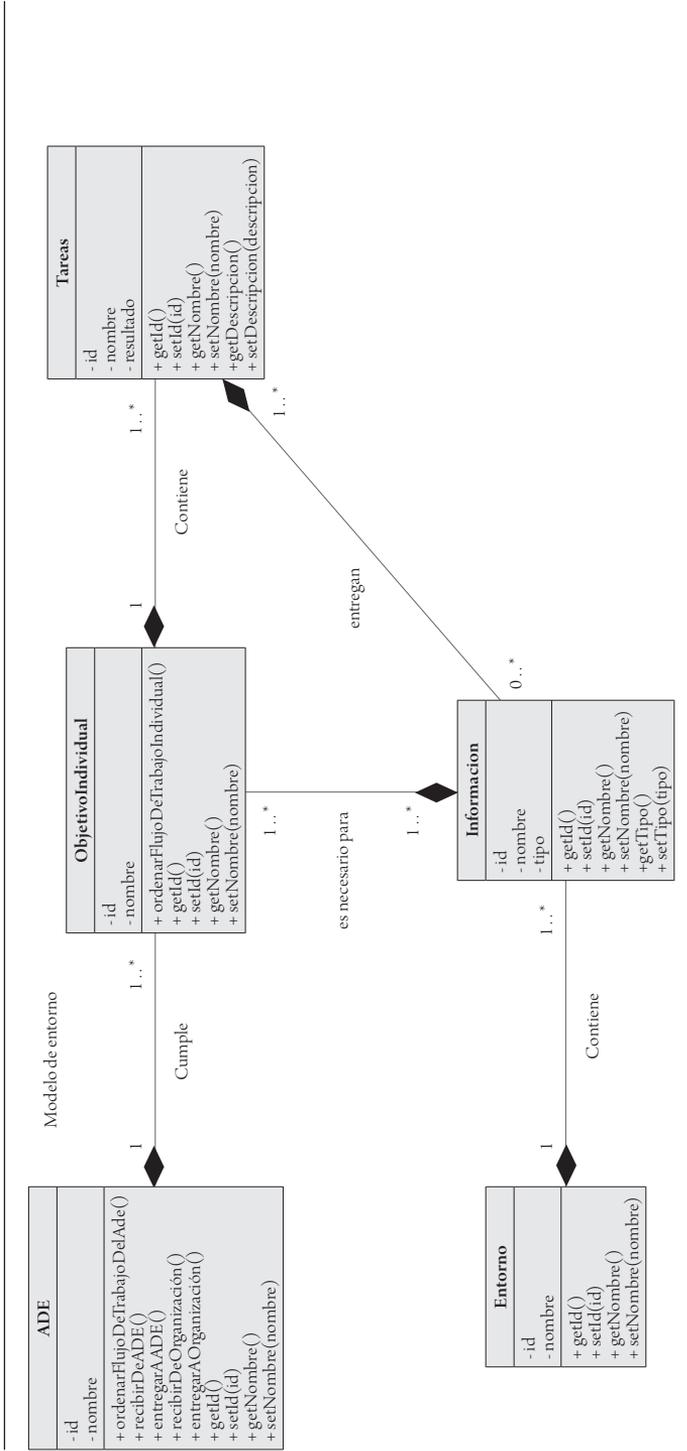


Figura 7. Modelo de entorno

Fuente: elaboración propia.

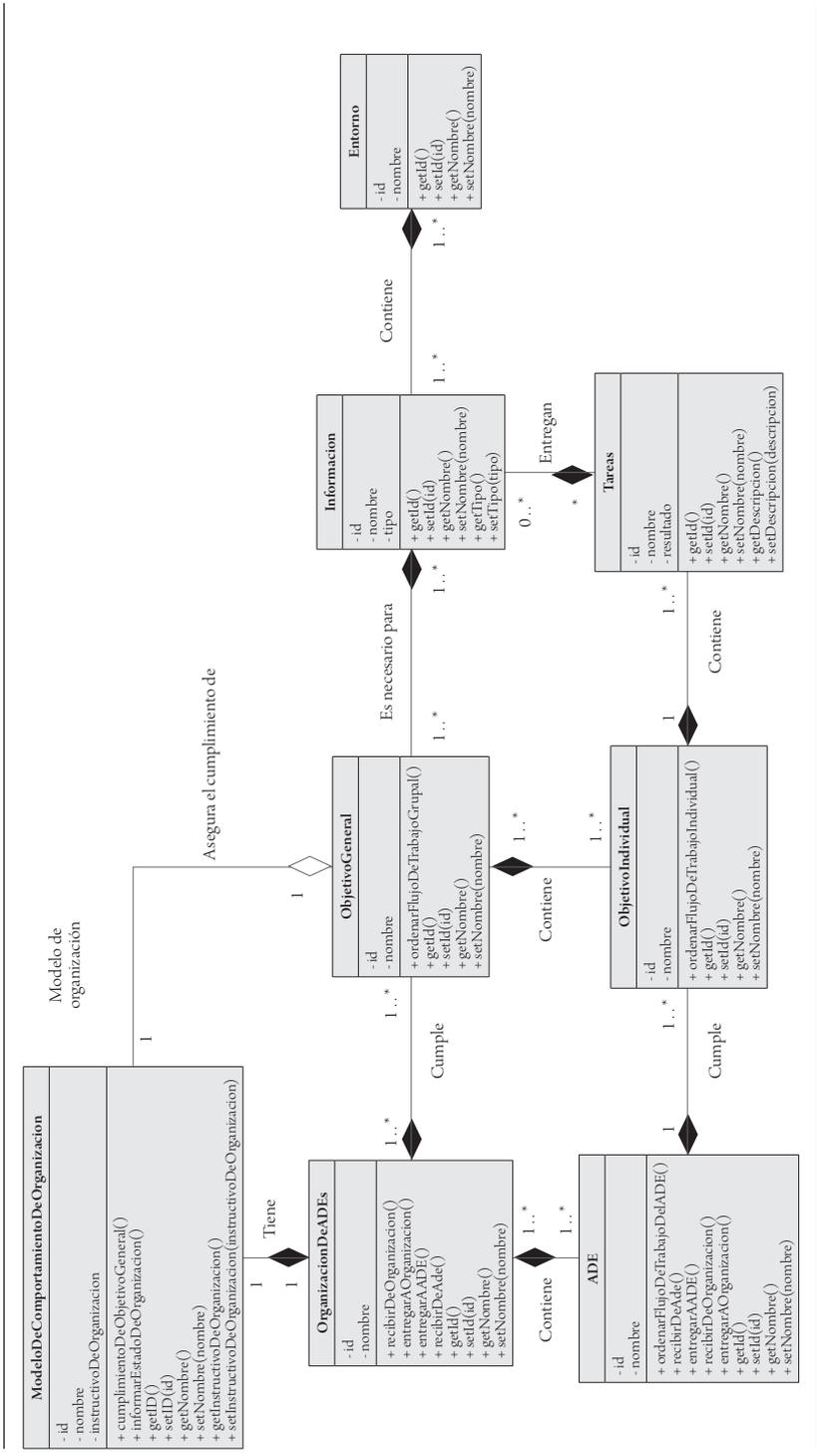


Figura 8. Modelo de organización

Fuente: elaboración propia.

Las entidades del MADE, su nomenclatura y sus cinco modelos concentran la formalización de los componentes del modelo de integración empresarial propuesto. Estos elementos son la base de conocimiento inicial para el futuro desarrollo de la metodología de aplicación del modelo.

El paso siguiente es la aplicación de los elementos obtenidos a un caso de estudio real, a fin de verificar su aplicabilidad en empresas del sector productivo. El demostrar que es posible modelar teóricamente una empresa de producción en particular a través de estos elementos creará la posibilidad de aplicación a otras empresas de producción, lo que garantiza altas probabilidades de éxito si se usa como base para el futuro desarrollo de una metodología de aplicación del MADE.

Conclusiones

Este artículo presenta los principales conceptos y definiciones del MADE y el proceso de formalización de sus componentes, para iniciar el desarrollo de una metodología que permita su aplicación en el ámbito industrial. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Actualmente, el MADE permite especificar, de una manera integral y sistemática, las diferentes funciones de una empresa; sin embargo, no cuenta con una metodología que permita aplicarlo. Uno de los pasos previos al proceso de desarrollo de dicha metodología es la formalización de sus componentes. El proceso de formalización implica llevar a cada elemento a una forma en que sus expresiones y significados sean estandarizados. Esto se logra empleando herramientas especializadas, normalizadas y reconocidas por la comunidad científica.
- La estructura original del MADE es un punto de partida importante para iniciar el proceso de formalización de sus componentes; sin embargo, surgió la necesidad de realizar modificaciones en sus elementos. La variación más importante se realizó en el elemento *modelo de comportamiento*, que pasó de ser un diagrama de flujo a un diagrama en redes de Petri. Lo anterior dio al modelo mayor formalidad y un mejor manejo de excepciones y errores durante la ejecución.
- El proceso de formalización de los componentes del MADE incluye tres pasos fundamentales: selección de una metodología existente para ser usada como referencia análoga, estudio de los conceptos de la metodología seleccionada

- y adaptación al MADE de los conceptos estudiados. Para la realización de cada uno de los pasos, se llevó a cabo un análisis de diferentes metodologías y herramientas que permitieran una correcta selección y aplicación del modelo.
- La formalización de los componentes del MADE da como resultado tres elementos: entidades, nomenclatura de las entidades y modelos. Con la definición de estos elementos, se puede dar inicio al proceso de desarrollo de una metodología de aplicación del modelo propuesto. Los elementos obtenidos tienen el grado de formalización deseado, ya que fueron derivados de un proceso de investigación y selección de las herramientas adecuadas para cada fin.
 - Los cinco modelos del MADE resultantes representan diferentes miradas, donde cada una cumple una función particular y considera una parte específica del sistema. Estos modelos son indispensables para lograr una representación completa y robusta del sistema, lo que facilita su posterior implementación a través de *software*. El diseño de los modelos del MADE fue pensado para una programación por capas: los modelos formarán parte de la capa de negocio, y la información descrita en los instructivos y modelos de comportamiento (los ADE, objetivos, señales de información, tareas, señales de activación, flujos de trabajo, identificadores) formará parte de la capa de datos.
 - El paso siguiente en la investigación es la aplicación, en un caso de estudio, de los elementos que abarcan la formalización de los componentes del MADE. Con esto se quiere demostrar que es posible modelar teóricamente una empresa de producción específica a través de estos elementos y crear la posibilidad de aplicación a otras empresas de producción. Lo anterior garantiza altas probabilidades de éxito si se usa como base para el futuro desarrollo de una metodología de aplicación del modelo.
 - Como trabajo futuro se prevé el inicio del proceso de desarrollo de la metodología de aplicación del MADE, usando la formalización propuesta. Esto permitirá verificar si dicha formalización es adecuada para la metodología de implementación del MADE y si esta logra incrementar las posibilidades de éxito de proyectos de automatización empresarial.

Referencias

- Balcells, J. y Romeral, J. (1997). *Autómatas programables*. Barcelona: Marcombo.
- Baumgartner, H. y Knischewski, K. (1989). *CIM-Basisbetrachtungen Produktionsautomatisierung*. Siemens-Aktiengesellschaft. Berlín: Wiley & Sons.

- Caire, G., Gómez, J. y Pavón, J. (2001). *MESSAGE-Methodology for Engineering Systems of Software agents* (informe técnico de EURESCOM, Proyecto P907). Recuperado de <http://ftp.eurescom.de/~pub-deliverables/p900-series/P907/T11/p907ti1.pdf>
- Cenfor, A., García, A. y Contreras, C. (2007). Sistema heterárquico de control basado en agentes para sistemas de fabricación: la nueva metodología PROHA. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4(1), 83-94.
- Chacón, E. *et al.* (1996). Integral automation of industrial complexes based on hybrid systems. *ISA Transactions*, 35, 427-445.
- Chacón, E. *et al.* (2001). An integration architecture for the automation of continuous production complexes. *ISA Transactions*, 41, 65-103.
- Doumeings, G. (1984). *Methodé GRAI: methode de conception des systems en productique*. Burdeos, Francia: Universidad de Burdeos I.
- Doumeings, G. y Zanettin, M. (1992). *GIM, GRAI integrated methodology, a methodology for designing CIM systems*. Burdeos, Francia: Universidad de Burdeos I.
- Durán, J. (2006). Integración en automatización. En *Técnicas emergentes para la automatización integrada de procesos industriales* (reporte técnico n.º 2). S. e.: Venezuela.
- García, A. y Castillo, F. (2007). *CIM, el computador en la automatización de la producción*. Castilla, España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- García, P. (1996). *Apuntes sobre la teoría de autómatas y lenguajes formales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Giret, A. (2005). *ANEMONA: una metodología multi-agente para sistemas holónicos de fabricación* (tesis del Doctorado en Informática). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gómez, D. y Manquillo, C. (2007). *Adecuación del modelo Siemens a las normas ISA S88 e ISA S95 con aplicación ilustrativa a un caso de estudio*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Gómez, J. (2002). *Modelado de sistemas multiagentes* (tesis del Doctorado en Informática). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Gómez, J. y Fernández, C. (2007). Model driven development and simulations with the INGENIAS agent framework. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, 1468-1482).
- Guevara, C. (2010). *Modelado para automatización de la operación de compras mediante la aplicación del Modelo Actor de Empresa al modelo general de actividades de ISA S95*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Hernández, S. y Viveros, D. (2008). *Aplicación del modelo Actor de Empresa en la especificación UML para la implementación de los bloques funcionales CAM, CAP y PPC del modelo resultante*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.

- Iglesias, C. y Garijo, M. (1998). *Analysis and design of multiagent system using MAS-CommonKADS*. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Kinny, D. y Georgeff, M. (1995). *A design methodology for BDI agent systems* (reporte técnico n.º 54). Australia: Australian Artificial Intelligence Institute.
- Leitao, P. (2004). *ADACOR: an agile and adaptive holonic architecture for manufacturing control* (tesis doctoral). Porto, Portugal: Universidad de Porto.
- López, D. Velasco, J. y Rojas, O. (2010). Principios básicos del nuevo modelo de integración empresarial: Actor de Empresa-ADE. *Épsilon*, 19, 81-102.
- Lozada, M. (2010). *Formalización de un modelo de referencia para integración empresarial basado en el concepto de actor de empresa* (tesis de maestría). Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Lüder, A., Peschke, J. y Bratukhin, A. (2008). *PABADIS based product oriented manufacturing systems for re-configurable enterprises*. Magdeburg, Alemania: Universidad de Magdeburg.
- Lüder, A., Peschke, J. y Sauter T. (2004). Distributed intelligence for plant automation based on multi-agent systems: the PABADIS approach. *Production Planning & Control*, 15, 201-212.
- Moncayo, M. y Girón, A. (2010). *Modelado del proceso de control de la fabricación en la manufactura asistida por computador*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Mora, V. y Mosquera, J. (2010). *Modelado del proceso de programación y control de la producción*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Moreno, K. y Alvarado, S. (2010). *Modelado del control estadístico de la calidad*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Olivé, A. y Gómez, C. (2003). *Diseño de sistemas software en UML*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez, L. (2006). Modelos de automatización. En *Técnicas emergentes para la automatización integrada de procesos industriales* (reporte técnico n.º 1). S. e.: Venezuela.
- Rivera, M. y Thola, O. (2010). *Modelado de la planificación de la producción*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Rojas, O. (2008). *Principios de un modelo dinámico para integración de empresas de manufactura* (tesis de maestría). Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Scheer, A. (1991). *Principles of efficient information management*. Berlín: Springer-Verlag.
- Sosa, G. (1998). *Metodología basada en redes de Petri híbridadas para la modelación, simulación computacional y análisis de procesos Batch*. Monterrey: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

- Soto, J. (2005). Modelling a knowledge management system architecture with INGENIAS methodology. En *Proceedings of the 15.th International Conference on Computing* (pp. 432-444). México: IEEE.
- Sycara, K. (1998). Multiagent systems. *AI Magazine*, 19(2).
- Vento, J. (2006). Optimización en automatización. En *Técnicas emergentes para la automatización integrada de procesos industriales* (reporte técnico n.º 3). S. e.: Venezuela.
- Vlietstra, J. (1991). An open system architecture in computer-integrated manufacturing: CIMOSA. *Journal of Applied Manufacturing Systems*, 10(1), 23-35.
- Williams, T. (1989). *Reference model for computer integrated manufacturing, a description from the viewpoint of industrial automation*. Lafayette, Estado Unidos: Purdue University.
- Williams, T. (1994). Contributions of the Purdue Enterprise Reference Architecture and Methodology (PERA) to the development of a General Enterprise Reference Architecture and Methodology (GERAM). En *Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision*. Singapur.
- Wood, M. y DeLoach, S. (2001). An overview of the multiagent systems engineering methodology. *Lecture Notes en Computer Science*, 1957, 208-221.
- Wood, M. y Sparkman, C. (2000). Multiagent software. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 10. Recuperado de <http://www.worldscientific.com/loi/ijseke>
- Wooldridge, N. y Jennings, N. (2000). *The GAIA methodology for agent-oriented analysis and design*. Recuperado de <http://www.cs.ox.ac.uk/people/michael.wooldridge/pubs/jaamas2000b.pdf>
- Wyns, J. (1998). *PROSA: Reference architecture for holonic manufacturing systems-the key to support evolution and reconfiguration* (tesis doctoral). Lovaina, Bélgica: Universidad Católica de Leuven.