

# PRINCIPIOS DE UNA METODOLOGIA PARA INTEGRACION EMPRESARIAL BAJO UN ENFOQUE HOLONICO

EDGAR A. CHACÓN R.<sup>\*</sup>, JUAN M. VELASCO M.<sup>+</sup>, OSCAR A. ROJAS A.<sup>+1</sup>

*\*Laboratorio de Sistemas Distribuidos y Automatización Industrial, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad de Los Andes  
Nucleo Universitario La Hechicera, Edificio B, ala sur 3<sup>er</sup> Piso, Mérida, Venezuela*

*+Grupo de I+D en Automática Industrial, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca  
Calle 5 No 4-50, Popayán, Cauca, Colombia*

*E-mails: echacon@ula.ve, jmvelasc@unicauca.edu.co, orojas@unicauca.edu.co*

**Abstract**— The integrated processes automation building is a hard to achieve, because several aspects must be take into account such as: process itself, equipment, management organization, coordination among production units and logistical aspects. It is necessary to have a methodology that helps in the building process of a Information and Communication Architecture that supports the automation of the production process. In this work, we propose a methodology based on holonic systems that are coordinated by using Discrete Event Systems (DES) supervision, in order to obtain an Information and Communication Architecture, which supports the global automation for the process in a integrated vision.

**Keywords**— Integrated Systems Automation, Discrete Events Dynamical Systems, Holonic Systems.

**Resumen**— La obtención de una automatización integral de procesos de producción debe tomar en cuenta diferentes aspectos tales como, el proceso mismo, la estructura organizativa de la empresa, los equipos y la gestión de los insumos. Para obtener un sistema integrado, que maneje los distintos aspectos, es necesario disponer de una metodología que permita seleccionar las estrategias de control, la integración horizontal entre los distintos procesos, y la coordinación de los mismos. En el trabajo se propone una metodología que permite alcanzar un esquema integral de automatización a partir de un enfoque holónico, estrategias de supervisión y coordinación basadas en Sistemas a Eventos Discretos (SED), hasta alcanzar las tecnologías de información y comunicaciones que permitan implantar la automatización.

**Palabras-clave**— Automatización Integrada de sistemas, Sistemas Dinámicos a Eventos Discretos, Sistemas Holónicos de Manufactura.

## 1 Introducción

La integración empresarial es un aspecto fundamental para romper con las barreras comerciales y cumplir las exigencias de la economía global actual, siendo indispensable recurrir al modelado empresarial con el objetivo de exteriorizar el conocimiento de la empresa, agregando valor o compartiéndolo según la necesidad; el modelo asociado debe representar la estructura, el comportamiento y la organización de la empresa, identificándose así los esquemas de control y coordinación de los procesos de negocios y los ambientes de toma cooperativa de decisiones. (Vernadat, 2002).

Por lo tanto, nuevas técnicas, herramientas, métodos y metodologías son necesarios para hacer frente a la complejidad de estos sistemas, los cuales deben cumplir con las características expuestas en (Botti and Giret, 2005) para lograr la competitividad global.

La metodología que se presenta, se desarrolla bajo el paradigma de Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), el cual está basado en una organización distribuida de entidades autónomas e inteligentes denominadas “Holones”, que trabajan de manera conjunta dentro de jerarquías temporales u “holarquías” en búsqueda del cumplimiento del objetivo global (Koestler, 1971). En las holarquías se definen reglas de cooperación entre los componentes para restringir sus decisiones autónomas, asegurándose desempeños controlables y predecibles en búsqueda de la optimización de recursos y la respuesta en el tiempo.

En este artículo se proponen los principios de construcción de una metodología para la integración empresarial bajo el paradigma HMS, en la cual se definen y especifican las fases que la constituyen, buscando su aplicabilidad sin restricciones en los grados de automatización de la empresa.

Para cumplir este objetivo, se propone un acercamiento donde el comportamiento del proceso, las condiciones de la operación y las condiciones del equipo se integran en una arquitectura de automati-

<sup>1</sup> Actualmente en intercambio académico en el Laboratorio de Sistemas Distribuidos y Automatización Industrial (LaSDAI) de la Universidad de los Andes, Mérida (Venezuela).

zación que toma como referencia la arquitectura denominada: “Modelo Referencial de Automatización Industrial - MRAI”, desarrollado en el Laboratorio de Sistemas Distribuidos y Automatización Industrial (LaSDAI) de la Universidad de los Andes de Mérida – Venezuela, el cual está basado en el concepto de unidad de producción de la cadena de valor de la empresa.

Para describir la metodología, el trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el concepto de unidad de producción para la construcción del HMS con base en el MRAI. En la sección 3 se describen todos los elementos que conforman el modelo de referencia MRAI, sobre el cual se enmarca la metodología. En la sección 4 se describen las fases que componen la metodología propuesta, y finalmente la sección 5 incluye la discusión del alcance de la metodología y las conclusiones del trabajo.

## 2 Modelo de la unidad de producción

El modelo de referencia MRAI se basa en el modelo de la cadena de valor con el objetivo de obtener una adecuada definición de los procesos de negocio de la empresa.

Dado que el componente jerárquico de las empresas de manufactura siempre se encuentra presente, el modelo MRAI se basa en la estructura jerárquica mostrada en la figura 1 en la cual la Unidad de Producción (PU) es el componente fundamental de la organización de la empresa (Chacón et al, 2002). Esta unidad de producción puede analizarse desde la composición de varias unidades de producción que conforman un Complejo de Producción (PCx), y la unión de ellos compone la empresa; donde todos ellos son considerados así mismos como unidades de producción (holones).

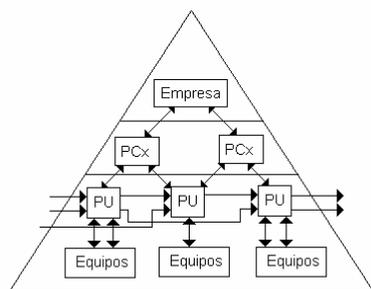


Figura 1. Arquitectura Organizacional de una Empresa de Manufactura.

La representación de la arquitectura global de la empresa se puede describir por medio del diagrama de clases que se presenta en la figura 2, el cual se ha desarrollado con el Lenguaje Unificado de Modelado (UML, 2003).

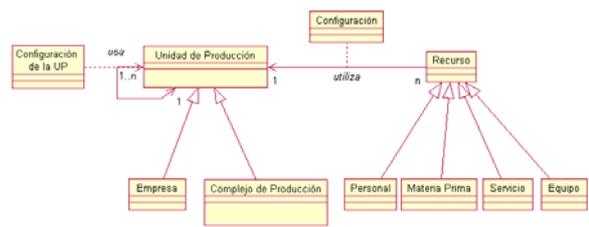


Figura 2. Diagrama de clases para arquitectura organizacional de una empresa

Por lo tanto, una unidad de producción se concibe como la composición de un conjunto de unidades elementales o recursos que son organizados y configurados, de tal manera que permitan realizar los procesos de transformación en la cadena de valor de la empresa de manufactura, con el objetivo de obtener los productos exigidos con las características especificadas.

La unidad de producción puede tomar sus propias decisiones respecto al cumplimiento de su objetivo, pero dentro de la holarquía está obligada a informar su estado en el cumplimiento de una meta o si ésta no se puede cumplir debido a fallas o errores en su comportamiento. Por lo tanto, una unidad de producción se puede representar como se muestra en la figura 3.

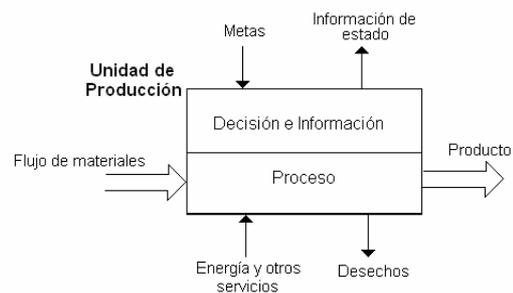


Figura 3. Unidad de producción.

En la figura 3, se puede observar que internamente la unidad de producción está compuesta por dos elementos: los elementos físicos, químicos o de información asociados al proceso que se encarga de transformar los productos, y la base de conocimiento de la unidad de producción que se ha denominado: “decisión e información”, la cual se encarga del control, supervisión y gestión de los procesos de acuerdo a las metas de producción y del intercambio de la información del estado de la unidad de producción con los demás componentes de la holarquía.

En la figura 4, se relacionan los componentes de una unidad de producción, dada en términos de objetos internos y externos que pueden introducir cambios en su misión (Chacón et al, 2002). El estado de la unidad de producción es un elemento relevante dentro de la holarquía, debido a que a través de él cada PU informa su comportamiento actual, y como éste es afectado por la presencia de cambios inesperados en los objetos externos.

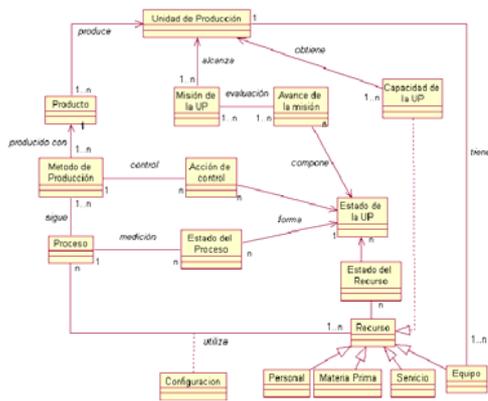


Figura 4. Componentes de una unidad de producción

### 3 Modelo Referencial de Automatización Industrial (MRAI)

El MRAI relaciona todos los elementos que conforman la pirámide de automatización mostrada en la figura 5, la cual constituye la arquitectura de referencia para describir los elementos tecnológicos y de gestión esenciales para alcanzar los niveles de automatización e integración deseados en la empresa (Montilva et al, 2000).

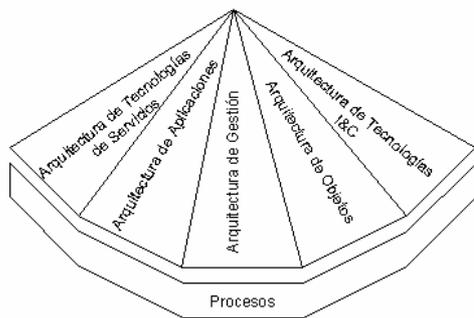


Figura 5. Arquitectura de referencia para automatización

A continuación se da una breve descripción de cada una de las caras de la pirámide que constituyen la arquitectura de referencia, la cual tiene como base el proceso de producción representado por el conocimiento adquirido a través de la cadena de valor.

#### 3.1 Arquitectura de Gestión

En este componente de la pirámide de integración se definen los procedimientos de tomas de decisiones orientados a cumplir la misión de las diferentes holarquías que conforman la empresa, siendo relevante que tenga un adecuado comportamiento dinámico donde las tomas de decisiones de los diferentes niveles en la estructura de la empresa sean eficientes y eficaces.

#### 3.2 Arquitectura de Tecnologías de Información y Comunicaciones (TIC's)

En este componente de la pirámide del Modelo Referencial de Automatización Industrial, se definen las arquitecturas de redes de comunicaciones y los equipos necesarios para los sistemas de almacenamiento y transferencia de información, así como la ejecución de aplicaciones y los procedimientos de tomas de decisiones del proceso.

La arquitectura de TIC's para cada unidad de producción este compuesta por tres niveles, los cuales se muestran en la figura 6.

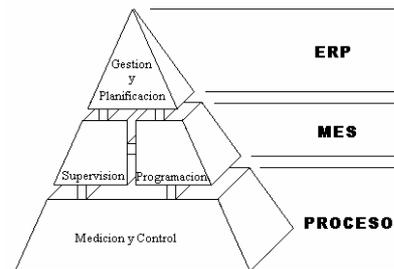


Figura 6. Estructura HMS de la arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones

En la figura 6, los niveles de Sistema de Ejecución de Manufactura (MES) y Planificación de Recursos de Empresa (ERP) no corresponden a las soluciones software clásicamente conocidas; se relacionan sus siglas para identificar las funciones que se deben establecer, configurar e implementar en cada una de las unidades de producción en la conformación de la holarquía. Por lo tanto, cada una de las unidades de producción, contiene estos tres componentes, debido a que ella autónomamente define los mecanismos de gestión y planificación, se supervisa, controla y programa para el cumplimiento de sus metas, además de informar su estado a los niveles superiores dentro de la holarquía.

#### 3.3 Arquitectura de Aplicaciones

En la arquitectura de aplicaciones se encuentran las herramientas software para realizar las tareas configuración y programación de equipos de planta, así como funciones de supervisión, programación, planificación y gestión de las unidades de producción del sistema HMS, las cuales contienen información sobre los procesos, recursos y los aspectos financieros.

#### 3.4 Arquitectura de Tecnologías de Producción

Esta arquitectura está estrechamente ligada al proceso físico, debido a que las tecnologías definidas en ella permiten el desarrollo de los procesos de negocios que constituyen la cadena de valor del producto. El MRAI realiza la separación del proceso y sus tecnologías de producción con el objetivo de independizar los procesos de negocios de una tecnología específica, brindando así la flexibilidad exigida actualmente a las industrias y evitándose la formación de

islas de automatización, lo cual reduce enormemente la inversión en herramientas software y/o hardware para la implementación del sistema de automatización.

### 3.5 Arquitectura de Objetos

El objetivo de esta arquitectura del MRAI es obtener modelos dinámicos que reflejen el comportamiento de la cadena de valor; en estos modelos se define el detalle del flujo de conocimiento, productos, datos e información entre las unidades de producción. Por ello, es relevante identificar los objetos de negocio y definir las reglas de negocios de la empresa para cada una de las unidades de producción, lográndose así la característica distribuida de la holarquía.

## 4 Fases de la Metodología de Integración

A continuación se describen las fases que constituyen la metodología de integración empresarial con referencia al “Modelo Referencial de Automatización Industrial”.

### 4.1 Integración Horizontal

El objetivo de esta fase es describir el proceso de producción para tener el conocimiento de los procesos de negocio y la identificación de los objetos de negocios, desde la demanda del producto hasta la entrega a los clientes; utilizándose para ello la descripción del proceso de producción mediante la cadena de valor. Por tanto, se obtiene un enfoque con orientación al proceso de producción y no corresponde a un enfoque de integración orientado al producto, al cliente o al dato, variable o tag como es clásicamente realizado en los sistemas centralizados.

El modelo basado en la cadena de valor toma en cuenta el flujo de producto y de información, y los conocimientos que deben existir entre las distintas unidades de producción, con el fin de acrecentar el valor del producto a medida que el mismo se desplaza. El flujo de información y productos a través de la cadena de valor va produciendo cambios en el estado de la holarquía, el cual está constituido por el reporte autónomo de cada unidad de producción que la conforma.

En la figura 7, a manera de ejemplo se muestra la cadena de valor de una empresa de productos lácteos.

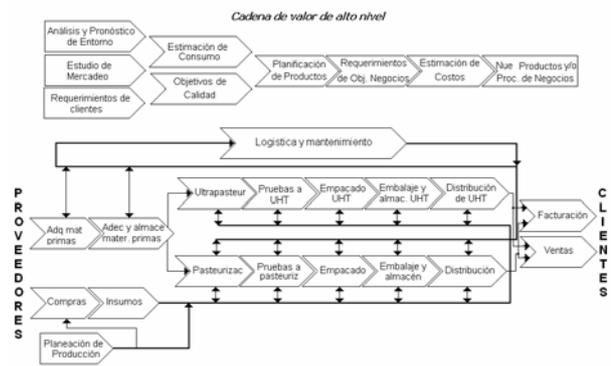


Figura 7. Cadena de valor de una empresa de productos lácteos.

### 4.2 Integración Vertical

La integración vertical es el componente que comprende los diversos niveles de administración de la unidad de producción, en la cual se define el conjunto de requerimientos, estrategias y/o reglas de negocios para los holones que se coordinan dentro de la holarquía.

En el enfoque propuesto, la integración vertical de la organización se realizará respecto al manejo del flujo de órdenes de producción, las cuales se convierten en objetivos establecidos desde las unidades de producción de los niveles superiores hacia la holarquía inmediatamente inferior, y la correspondiente información retroalimentada con los reportes de estado de esta holarquía. En cada nivel, la unidad de producción debe tener en cuenta indicadores que permitan evaluar su desempeño y establecer sus estrategias conformes a su entorno. En la conformación de la holarquía, las unidades de producción operan de una manera coordinada para el establecimiento de su misión, la cual es comparada con su estado actual con el objetivo de definir estrategias de planificación, programación y control. La definición de la misión para cada unidad de producción debe considerar aspectos económicos para optimizar los tiempos de respuesta, tales como costos de producción, costo de los insumos y costo de los productos intermedios y finales. Estos conceptos son mostrados en la figura 8.

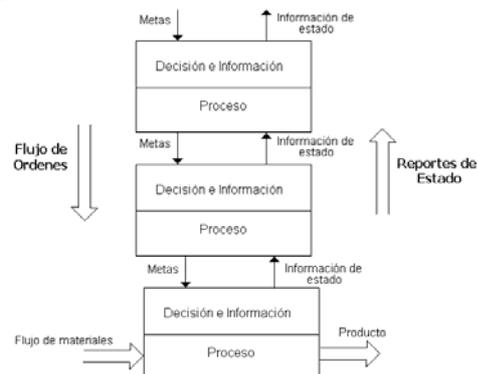


Figura 8. Integración vertical.



un sistema híbrido, el cual resulta de la composición y del acoplamiento del comportamiento discreto del sistema de control (supervisor) y del comportamiento de proceso híbrido (discreto y continuo) dado por el método de producción; conformándose el esquema de supervisión que se muestra en la figura 12 (Chacón et al 2004).

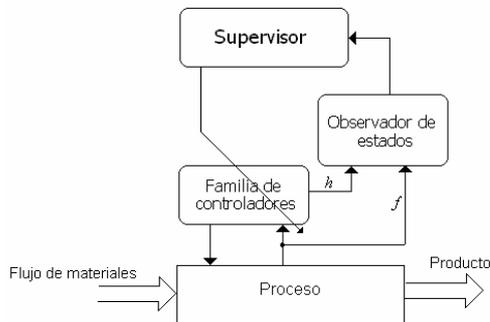


Figura 12. Esquema de supervisión.

Por lo tanto, existe una familia parametrizada de controladores continuos que controlan la dinámica del sistema continuo en las diversas regiones de operación del proceso. Desde el enfoque dado por Lygeros (Lygeros, 1996), el sistema híbrido está definido por:

$$HS = (X, U, Y, f, E, h, I) \quad (1)$$

Donde:

- $X = X_c \times X_d$  variables de estado, donde  $X_d$  es el subconjunto de variables discretas y  $X_c$  es el sistema de variables continuas.
- $U = U_d \cup U_c$  conjunto de entradas discretas y continuas.
- $Y = Y_d \cup Y_c$  conjunto de salidas discretas y continuas.
- $f: X \times U \rightarrow TX_c$  describe la dinámica continua, donde  $q(t)$  es constante en el intervalo  $(t_o^i, t_f^i]$ .
- $E \subset X \times U \times X$  describe la dinámica del sistema.
- $q(t)$  representa un conjunto de variables discretas y de variables continuas que permanece constante para cada estado discreto  $q$  del sistema.
- $h: X \times U \rightarrow Y$ .
- $I = (x(t_o), q(t_o))$  es la condición inicial donde  $x(t_o)$  y  $q(t_o)$  pertenecen a  $X_d$ .

El supervisor al ser un sistema de eventos discretos, va a cumplir la función de forzar una combinación de predicados compuestos de variables continuas y variables discretas, dependiendo del estado en el que se encuentre la unidad de producción. Esta combinación de predicados corresponde a una activación de transiciones en los modelos de los diferentes componentes de la unidad de producción, las cuales deben ser disparadas en los tiempos de respuesta esperados, como respuesta a las situaciones ante las cuales el supervisor está diseñado. Estas situaciones se pueden clasificar como eventos controlables (inicio de un proceso de producción, nueva configura-

ción de operación, activación de mecanismos de parada, iniciación de actividades de mantenimiento) y eventos no controlables (cambio de estado en una meta de producción, estado de disponibilidad de un recurso, situación anormal en un proceso de producción o fallas en un recurso). El supervisor debe tener una respuesta para cada evento detectado y si existe una condición que no tenga una secuencia de activación de transiciones predefinida, el estado de la unidad de producción será llevado por el supervisor a una situación de parado de emergencia; estado que corresponde al subconjunto  $X_d$  plenamente conocido y validado.

#### 4.4 Arquitectura de Tecnologías de Información y Comunicaciones

Como fase siguiente de la metodología, se procede a definir las arquitecturas de redes de comunicaciones y los equipos necesarios que soportan los sistemas de almacenamiento, transferencia de información, la ejecución de aplicaciones y los procedimientos de tomas de decisiones del proceso.

En nivel inferior del proceso (holones básicos) se encuentran distribuidos los equipos y dispositivos de campo satisfaciendo requerimientos de tiempo real estricto con el intercambio de información a través de protocolos de buses de campo, trabajando con esquemas de comunicación asincrónicos basados en el cambio de estado de los dispositivos de campo y comunicaciones sincrónicas configuradas para la comunicación con los equipos de control.

Para el soporte de las operaciones de programación, supervisión, gestión y planificación que deben realizarse en las unidades de producción, los equipos que se encuentran en este nivel ejecutan procesos de negociación con el objetivo de conformar la holarquía que responderá a las dinámicas presentes en su comportamiento. A manera de ejemplo, en la figura 13 se presenta la propuesta de la arquitectura de TIC's para una empresa de productos lácteos, en la cual no existe una base de datos centralizada, permitiendo mayor reactividad, agilidad y reconfiguración en los procesos de tomas de decisiones para las diferentes unidades de producción que conforman el HMS.

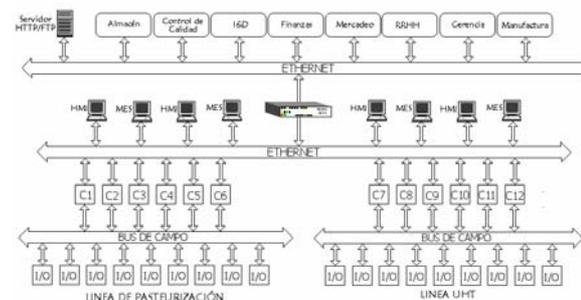


Figura 13. Propuesta de arquitectura teleinformática de una empresa de productos lácteos.

#### 4.5 Arquitectura de Aplicaciones

Como se detalló anteriormente, en la arquitectura de aplicaciones se encuentran las herramientas software para realizar las tareas de configuración y programación de equipos de planta, así como la supervisión, planeación y gestión de los procesos, recursos y los aspectos financieros en los diferentes niveles de la holarquía. Por tanto, es fundamental identificar las herramientas software que requiere la empresa para su automatización, debido a que en el uso de muchas aplicaciones se pierde eficiencia y garantía en las reglas de negocios. Es así como, se debe concebir el desarrollo de aplicaciones que desliguen a la empresa de soluciones propietarias, los cuales deben ser orientados a optimizar los procesos de negociación dentro de las holarquías constituidas por las unidades de producción.

### 5 Conclusiones

En el trabajo se ha mostrado una metodología que permite obtener una arquitectura de comunicación en información, que soporta de manera integral los distintos procesos de decisión mediante una jerarquía de sistemas dinámicos a eventos discretos, construida de acuerdo a la holarquía de las unidades de producción. La integración vertical, de decisiones, es alcanzada mediante los intercambios de mensajes (eventos) que informan sobre el estado de cada Holón en la holarquía, y que reciben mediante mensajes, consignas de producción, que autónomamente definen un esquema de producción internos a partir de modelos conocidos en cada holón. La integración horizontal y la coordinación que asegura una cooperación entre los holones, se obtiene de los modelos de flujo de materia y su incremento de valor (cadena de valor del producto).

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con la colaboración del Postgrado en Ingeniería en Control y Automatización de la Universidad de los Andes – Mérida (Venezuela) y el Instituto de Estudios de Postgrado en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca – Popayán (Colombia).

### Referencias Bibliográficas

Botti, V and Giret, A (2005). *ANEMONA: Una metodología multiagente para sistemas holónicos de fabricación*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia.

Chacón, E; Besembel, I.; Narciso, F; Montilva, J and Colina, E. (2002). *An integration architecture for the automation of continous production complexes*. ISA Transactions 41, Universidad de Los Andes.

Chacón, E; Besembel, I.; and Rico, D. (2003). *Bases de datos orientadas por objetos en la integración y automatización de procesos de producción continua*. Technical report, Universidad de Los Andes.

Chacón, E; Besembel, I.; and Hennect, J. (2004). *Coordination and optimization in oil and gas production complexes*. Computers in Industry 53: 17–37

Koestler, A (1971). *The Ghost in the Machine*. Arkana Books.

Lygeros (1996). *Hierarchical, Hybrid Control of Large Scale Systems*. Ph.D. Thesis, Electrical Engineering Department, University of California, Berkeley.

Montilva, J.; Chacón, E.; and Colina, E. (2000). *Metas: Un método para la automatización integrada en sistemas de producción continua*. Actas de las IV Jornadas Panamericanas de Automatización.

UML (2003). *UML 2.0 superstructure specification*. ptc/03608-02, OMG, www.uml.org..

Vernadat, F.B. (2002). *Enterprise modeling and integration (EMI): current status and research perspectives*. Annual Reviews in Control, 26: 15-25.