

DISEÑO DE SUPERVISORIO INTELIGENTE DE PLANTA DE BLOQUES DE CONSTRUCCIÓN

ISRAEL BENITEZ-PINA, RUBEN SICCHAR-VILCHEZ

*Depto Controle e Automacao, Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado de Amazonas
Ave Darcy Vargas, Manaus, AM, BRASIL*

E-mails: benitez.israel@gmail.com, jrubensicchar@gmail.com.br

MICHEL SANZ-PEREZ, JADID TAMAYO-PACHECO

*Depto. de Control Automatico, Facultad de Ing. Electrica, Universidad de Oriente
Ave Las Americas s/n Esq. A Casero, Rpto. Sueno. CP 90400, Santiago de Cuba, CUBA*

E-mails: msanz@fie.uo.edu.cu, jadid@fie.uo.edu.cu

Abstract— The new complete automation systems integrate the administration and planning of the production with the supervisory and industrial control systems (local and remote) having a synchronized operation, in a fast and efficient way. In addition to the increase in the complexity of the integrated automation, smart features of reconfiguration and safety of the automated system are added in a concurrent form. It's require the union of the artificial intelligence and distributed control in the multiagent systems (MAS), and the use of the UML-PN model with property verification and functional validation by the dynamic simulation of the system. The application of a methodology of modeling UML-PN is presented; using the methodology MaSE modified by the addition of GHENeSys hierarchical extended Petri nets inside a multiagent design allowing reconfiguration to increase of the quality and productivity of the manufacture of construction blocks in a company located in Santiago de Cuba. It constitute initial step to develop new agents of safety concurrently with quality agents. Novel elements in the methodology are added and a multiagent architecture is obtained, permitting the fulfillment of the objectives of the company.

Keywords— Intelligent Automation Control, Supervisory Systems, UML-PN Modelling, Fuzzy controllers

Resumo— Os novos sistemas de automação completa integram o gerenciamento e planejamento da produção junto com a supervisão e os sistemas de controle industrial (local e remoto) tendo uma operação sincronizada, em forma rápida e eficiente. Além do incremento na complexidade da automação integrada, são adicionadas novas tarefas inteligentes de reconfiguração e segurança do sistema de automação na forma concorrente, requerendo a união da inteligência artificial e o controle distribuído em sistemas multiagentes (MAS), utilizando os modelos UML-PN com verificação de propriedades e validação funcional por meio da simulação do sistema. É apresentada a aplicação da metodologia de modelado UML-PN usando a metodologia MaSE modificada pela adição das Redes de Petri hierárquicas estendidas GHENeSys dentro do *design* multiagente, permitindo a reconfiguração para incrementar a qualidade e produtividade de uma indústria de fabricação de blocos de construção em Santiago de Cuba. Isto constitui um passo inicial para desenvolver novos agentes de segurança concorrentemente com os agentes de qualidade. Novos elementos são adicionados na metodologia para obter a arquitetura multiagente, permitindo cumprimentar os objetivos da indústria.

Palavras-chave— Controle Automático inteligente, Sistemas supervisórios, Modelagem UML-PN, Controladores nebulosos.

1 Introducción

El desarrollo de la informática, las comunicaciones digitales y los sistemas de automatización industriales están generando una nueva revolución industrial (Marik, 2005; Colombo, 2006; Brennan 2007). Aparecen los sistemas de automatización completa donde se integran los sistemas de administración y planificación de la producción con los sistemas de supervisión y control industrial (remoto y local) teniendo una operación sincronizada, de modo eficiente y rápido (Marik, 2005; Colombo, 2006; Brennan 2007), así como en la integración con funciones concurrentes de tolerancia a fallos y mantenimiento preventivo.

Para resolver esta integración de la automatización industrial moderna se utiliza un incremento en el nivel de inteligencia distribuida por todo el sistema y

una gran interacción de todas sus partes en la toma de decisiones de control eficientes y rápidas, de modo que se confirma el uso de sistemas multiagentes (Marik, 2005; Colombo, 2006; Brennan 2007). Todo esto no permite utilizar un simple método de modelado. Se requiere de una herramienta que pueda modelar la red de automatización inteligente completa de una empresa, para lo que se debe utilizar la mezcla del lenguaje de Modelado Unificado (UML) con las facilidades gráfico-matemáticas de las Redes de Petri (PN) (Colombo, 2006; Fernandes, 2009; Han 2003; Leitao 2009; Benitez 2013).

Paralelo a esto, en el estado del arte (*survey*) sobre temas de investigación y aplicaciones en el área de control de sistemas distribuidos en tiempo real de Brennan (University of Calgary, Canadá) (Brennan 2007) se explican las facilidades de la teoría y tecnología de Agentes para obtener buenos resultados en la solución de los problemas de reconfiguración y tolerancia a fallos requeridos en el control distribuido

moderno en sistemas de manufactura flexible. Esto quiere decir que al aumento de la complejidad de la automatización integrada se adicionan funciones inteligentes de reconfiguración y seguridad del sistema automatizado de forma concurrente, reafirmando el uso del modelado UML-PN con la verificación de propiedades y la validación funcional (Mendling 2009) mediante la simulación dinámica del sistema.

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología de modelado UML-PN de agentes inteligentes distribuidos utilizando las redes de Petri jerárquicas extendidas GHENeSys (Benitez 2008) dentro del diseño multiagente que permita elevar la calidad y productividad de la fabricación de bloques de construcción en una empresa de Santiago de Cuba. Se adicionan elementos novedosos en la metodología y se obtiene una arquitectura multiagente que permite el logro de los objetivos de la empresa.

2 Metodología de Diseño del sistema de supervisión inteligente

Los sistemas de supervisión industrial modernos están preprogramados para cumplir con las funciones clásicas de adquisición de datos, monitorización, supervisión funcional del proceso, visualización de estados, alarmas y eventos, mando secuencial, grabación de acciones y recetas, estudio de tendencias y reportes productivos, así como garantizar seguridad de acceso al sistema y a los datos (Baley, 2003), pero se adiciona la posibilidad de programar funciones especiales de asesoría inteligente de tolerancia a fallos y mantenimiento preventivo (Brennan 2007). Estas funciones especiales permiten la supervisión eficiente del sistema automatizado (rápida respuesta en gestión de la producción, reconfiguración, seguridad y mantenimiento preventivo).

La inteligencia artificial y el control distribuido tienen su más alto exponente en los sistemas multiagentes (MAS) (Shen, 2006) y Holon (agente con soporte físico) (Colombo, 2006; Leitao 2009]. Estas estructuras son las bases para obtener, desde la fase de diseño, sistemas reconfigurables y críticamente seguros basados en tecnología de redes de automatización con PCs-PLCs. En este campo, muchos trabajos también demuestran la actualidad de la mezcla de la tecnología de diseño basada en agentes y el modelado en redes de Petri (Colombo, 2006; Fernandes, 2009; Han 2003; Leitao 2009; Benitez 2013). Este trabajo se centra en crear facilidades de reconfiguración mediante agentes inteligentes para dejar las bases que permitan adicionar luego niveles de seguridad y mantenimiento concurrentemente.

Un Agente de software es un programa, que tiene una serie de rasgos o cualidades, que hacen que sea capaz de interactuar con su entorno y aprender de él,

tomando así sus propias decisiones basándose en el conocimiento acumulado (Jennings 2003).

Los Agentes inteligentes creados en funciones del SCADA (Bailey 2003) tienen comunicación directa con los programas en los dispositivos de campo, pudiendo gobernar eficientemente toda la automatización integrada. Tienen su programación compartida entre el software SCADA en la PC y las funciones en tiempo real en el PLC como se puede apreciar en el sistema multiagente diseñado por Rockwell Automation (Marik, 2005) de la Figura 1

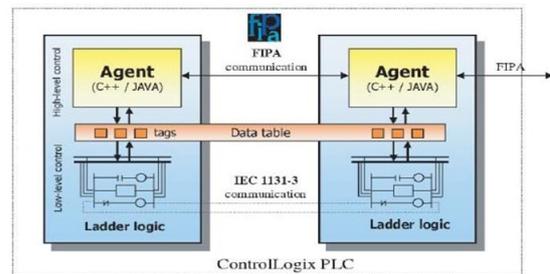


Figura 1. Arquitectura multiagente en redes de automatización con PLCs ControlLogix de Rockwell Automation (Marik, 2005)

Las decisiones inteligentes dejan de ser centralizadas en el control principal (*Master*) para tomarse cooperativamente entre cada Holon (Leitao 2009). No obstante, el aspecto más discutido en la arquitectura de agentes inteligentes es la forma de implementar el funcionamiento de su inteligencia. Se definen varias características de los agentes (Shen, 2006), destacándose las Creencias como la noción que tiene un agente sobre sí mismo y sobre su entorno, quien es y de donde viene, quienes son sus iguales. Se pueden subdividir en:

- Las metas, que son los objetivos a largo plazo es decir, a donde va a llegar, o la meta a cumplir.

- Los deseos, que son los objetivos a corto plazo u objetivos actuales que le ayudan a cumplir con los objetivos principales.

- Las intenciones o planes, que son los métodos para el cumplimiento de los objetivos principales y/o actuales.

Basado en esto surge la arquitectura BDI (*Beliefs, Desire, Intentions*) (Mora, 1999) como descripción formal de la inteligencia de los agentes propuesto por Kavi (Kavi, 2002), que simplifica las metas como una estructura de datos, los deseos como los valores que toman esas estructuras, y los planes son los programas que los implementan. Consideramos esta arquitectura cognitiva es la que tiene más facilidades de implementación comparada con las arquitecturas reactivas (Juchem 2001), pero todavía es un tema de debate científico internacional (Brennan 2007, Leitao 2009). Proponemos que las metas sean las estructuras que representan el conocimiento, los deseos las adecuaciones de esa representación del conocimiento a la situación actual del entorno del agente, y las intenciones sean los métodos que implementan una má-

quina de inferencia para la toma de decisiones en base a ese conocimiento.

Utilizando algoritmos inteligentes nebulosos, difusos o borrosos (fuzzy) (Godoy, 2007) podríamos considerar un controlador fuzzy basado en Mandani (Godoy, 2007) donde las metas son las reglas de inferencia fuzzy, que según las diferentes condiciones del ambiente de trabajo pueden adaptarse de acuerdo a los deseos del agente y las intenciones están contenidas en la estructura funcional del controlador y los métodos para adecuarlo al entorno.

Otro aspecto de debate internacional es la metodología de diseño de sistemas multiagentes. Existen varios enfoques y métodos de diseño de sistemas multiagentes que pueden encontrarse en las investigaciones del grupo de PUC-Rio que desarrolla el MAS-UML (Silva, 2008):

- Entre los lenguajes de modelado MAS que no extienden UML pueden presentarse Gaia (Wooldridge, 2000), MaSE (Wood, 2001), ANote (Choren, 2005).
- Entre los que extienden UML: AUML (Bauer, 2001), MAS-ML (Silva, 2008).
- Entre los métodos que utilizan estos lenguajes de modelado MAS están MESSAGE (Caire, 2001), Prometheus (Trappey, 2009) entre otros.

Consideramos a MaSE y su herramienta de diseño AgentTool (Wood, 2001), como una de las más completas porque va desde los requisitos hasta la implementación, pero utiliza como verificador de propiedades y validador funcional un simulador dinámico basado en autómatas finitos. Sin embargo, las redes de Petri tienen más expresividad gráfica, manteniendo la misma fortaleza matemática. Se propone utilizar dicha metodología pero sustituyendo las herramientas de verificación y validación por modelos basados en las redes de Petri jerárquicas extendidas GHENeSys (Benitez 2008) porque la jerarquía de la PN le permite adecuarse a la jerarquía de metas de los agentes, y las extensiones permiten el modelado en tiempo real y el uso de lugares auxiliares y arcos especiales para las condicionales de disparo de transiciones directamente relacionadas con las condicionales de tomas de decisiones de los agentes.

3 Descripción del diseño de supervisorio inteligente de producción de bloques de construcción

Se explica resumidamente el diseño de un sistema de supervisión inteligente distribuido que permite elevar la calidad y productividad de la fabricación de bloques de construcción en una empresa de Santiago de Cuba aplicando la metodología MaSE modificada (utilizando redes de Petri) y la arquitectura BDI vinculada a micro-sistemas con inteligencia difusa colaborativa.

La empresa tiene cuatro secciones: Dosificación (prepara la mezcla de hormigón con la receta requerida), Prensado (llena el molde y prensa), Transporte-Curado (transporta a las celdas de curado

donde se realiza el secado de los bloques) y empaquetado (organiza los *palets* para venta de los bloques).

La calidad y productividad de la empresa tiene múltiples inconvenientes para garantizar un bloque bien formado con la resistencia requerida y en las cantidades que demandan los planes de desarrollo habitacional de la región. Como ejemplo en cada una de las secciones están:

- La receta de dosificación ideal según la calidad de los áridos, cemento y agua, así como el tiempo y velocidad de mezclado.
- La presión de prensado y la secuencia de vibraciones óptima para una buena formación del bloque.
- El transporte suave y sin golpes que mantenga la integridad de los bloques frescos y el tiempo de curado ideal.
- La velocidad máxima de movimiento y agarre firme de los grupos de bloques a empaquetar.

Todos estos factores obedecen a criterios y experiencia acumulada por los diseñadores y operarios y varían de acuerdo a factores de materias primas, ambientales, tecnológicos, averías, etc., que deben tenerse en cuenta para un funcionamiento eficiente del sistema de automatización integrada. Esto puede lograrse mediante un sistema MAS en toda la automatización integrada aprovechando las facilidades de la inteligencia difusa para captar la experiencia de operarios y especialistas.

De acuerdo a la subdivisión de la empresa en sus cuatro grandes secciones se realizó el diseño de cada área de forma independiente, para luego integrarse como indica la figura 2.

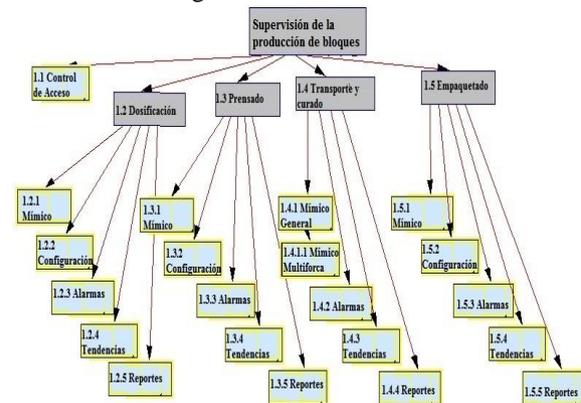


Figura 2. Diagrama de metas del Sistema Supervisorio Multiagente de la fábrica de bloques de construcción de Santiago de Cuba

Se diseñó un agente inteligente por cada sección y otros subagentes acoplados al funcionamiento de los diferentes equipos tecnológicos con el objetivo de utilizarlos luego en la atención a fallos y planificación de mantenimiento de cada uno de ellos. En la Figura 2 se representa el diagrama de metas principal de toda la empresa en AgentTool 2.0.

La Figura 2 tiene metas para las funciones clásicas de supervisión de cada sección (ejemplo: 1.2.1 a 1.2.5), que todas están contenidas dentro del rol del agente de cada sección (ej: 1.2). Sin embargo, la to-

ma decisiones inteligente está centrada en cada bloque de configuración (solo en el caso de transporte es en el multiforca (transportador)). En una primera etapa del proyecto se trabaja solo en la parte de control de calidad de los bloques y por tanto se concentra la inteligencia en la tarea de configuración eficiente dentro del agente supervisor de cada sección.

3.1 Dosificación

En la figura 3 se ven en más detalles las metas del supervisor de dosificación que incluyen, dentro de la meta de manejo del mímico, las submetas de control de alimentación de áridos, movimiento de estera, dosificación de cemento y agua, control de mezcladora.

De todas estas metas indicadas en la figura 3 es la de configuración de la dosificación de áridos que se encuentra contenida en la supervisión de la dosificación, la más importante para la calidad de los bloques. Dicha calidad depende de los tipos de material empleado y su humedad que afectan el ajuste de la receta de mezcla.

El paso del supervisor convencional para el supervisor inteligente se va realizando por etapas. En esta sección se inicia por las mayores afectaciones a la calidad de la mezcla para bloques de construcción, concentrada en la meta 1.2.2 de configuración de la receta que constituye la parte inteligente de la supervisión de dosificación (meta 1.2). La demás metas de mímicos, alarmas, tendencias y reportes corresponden a las de un supervisor convencional.

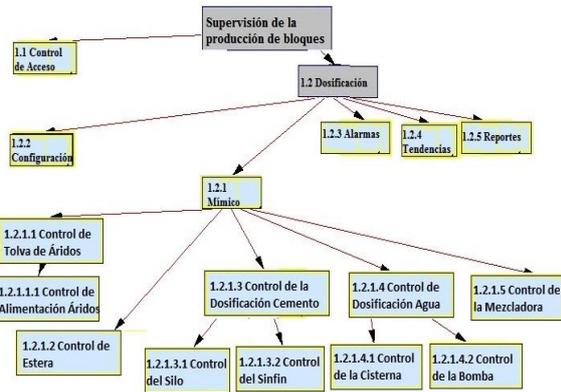


Figura 3. Diagrama de metas del Sistema Supervisor Multiagente de la dosificación para la fabricación de bloques de construcción

En la figura 4 se presenta el diagrama de roles que permite un mejor detalle de la supervisión de la dosificación que realiza el Rol Manejador del Mímico, fundamentalmente en el reajuste de las recetas de áridos y agua, porque la granulometría de la arena y su contenido de humedad son factores muy variables en dicho proceso.

Las demás fases de la metodología MaSE modificada (Benitez 2013) nos permiten llegar hasta el nivel del detalle funcional interno del agente, donde se utilizan los diagramas de estados con asociación dinámica a un tipo de modelado formal. En el Agent-

Tool (Wood, 2001) se utilizan los autómatas finitos y sus herramientas de verificación de propiedades y validación funcional pero consideramos más eficiente utilizar las Redes de Petri por tener mayor expresividad gráfica y muchos métodos eficaces de verificación y validación. Como ejemplo se propone la interpretación de la arquitectura del agente dosificador de áridos realizada a partir de su diagrama de estado en redes de Petri de la Figura 5 utilizando el Visual Object Net 2.7 (VON2.7).

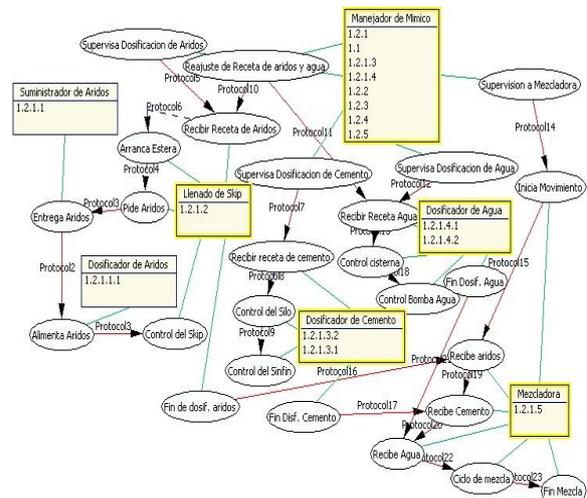


Figura 4. Diagrama de roles del Sistema Supervisor Multiagente de la dosificación para la fabricación de bloques de construcción

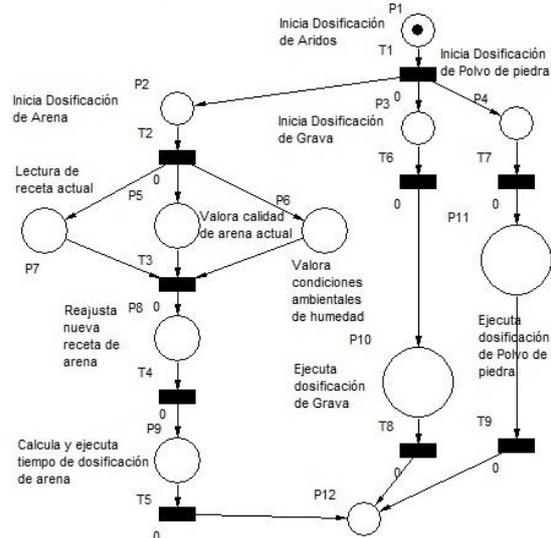


Figura 5. Diagrama de estados en Redes de Petri GHENeSys del agente dosificador para fabricación de bloques de construcción

Los modelos en redes de Petri llevan verificación de las propiedades de vivacidad, limitación y alcanzabilidad para garantizar la ausencia de bloques o lazos infinitos en el programa de implementación. También se realiza la validación funcional de todos los requerimientos establecidos por el cliente mediante la simulación dinámica de su funcionamiento (Benitez 2008).

Los lugares P5, P6 y P7 de la Figura 5 representan las entradas del control de evaluación de la receta de áridos y el lugar P8 donde se realiza este ajuste. Esto se corresponde en la Figura 4 con la tarea de reajuste

de receta de áridos y agua del rol de Manejador de mímico, que a su vez se corresponde con la meta 1.2.2 del diagrama de metas asociada al agente supervisor de dosificación (Figura 3). Como se puede ver en las figuras antes mencionadas, la metodología va permitiendo detallar las acciones y sus actores hasta el nivel de programación evitando errores de diseño.

El modelo propuesto en la Figura 5 permite que sean evaluadas las condiciones actuales que pueden modificar la receta de arena según la calidad de la arena actual (granulometría, cantera de procedencia, etc), así como las condiciones ambientales (humedad ambiente y de la arena) y reajusta la receta actual antes de realizar la dosificación de la misma.

Para la toma de decisiones sobre este ajuste se parte de informaciones y de la experiencia de operadores que se acerca más a una representación difusa que determinística. Por esto en la Figura 6 se detalla la forma en que se diseñó el regulador supervisor borroso para ajustar la receta de arena de acuerdo a estos dos factores. Se partió de la experiencia de operadores experimentados para representar el conocimiento acumulado basado en una representación difusa (*fuzzy*) de estas variables y con la aplicación del método de Mandani se obtiene la toma de decisiones mediante reglas para ajustar la nueva receta.

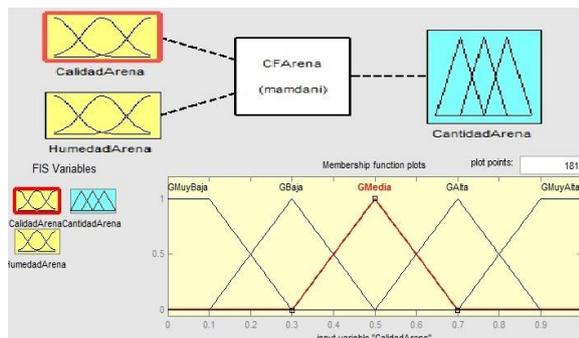


Figura 6. Diseño del controlador supervisor borroso para reevaluar la receta según la calidad de la arena

De acuerdo a esto se concluye que en una primera fase tendremos un agente de dosificación basado en inferencia borrosa para reajustar la receta, y luego en una segunda fase interactuará con el agente de fallos y mantenimiento para mantener la calidad y productividad de esta sección de la industria, pero en estos momentos interactuará con los agentes de configuración de las otras cuatro secciones de la planta para garantizar la calidad de los bloques construidos.

3.2 Prensado

En forma similar a lo efectuado en la sección de dosificación se realiza el modelado de los agentes de prensado utilizando MaSE y el AgentTool. Para esta sección la calidad de los bloques está centrada en la presión del prensado, el tiempo y el ciclo de las vibraciones, pero esto no requiere de implementar un regulador fuzzy para estos lazos, por lo que fueron

implementados controladores PI y secuenciales respectivamente, quedando la inteligencia en el reajuste de estos lazos. Se realizó el modelado de las etapas de prensado en Redes de Petri jerárquicas extendidas GHENeSys quedando una red general con la estructura de la Figura 7.

También se le realizó la verificación de propiedades funcionales de vivacidad, limitabilidad, y alcanzabilidad, obteniendo buena formación del modelo. Luego se realizó la validación de los requerimientos funcionales mediante simulación en el VON 2.7.

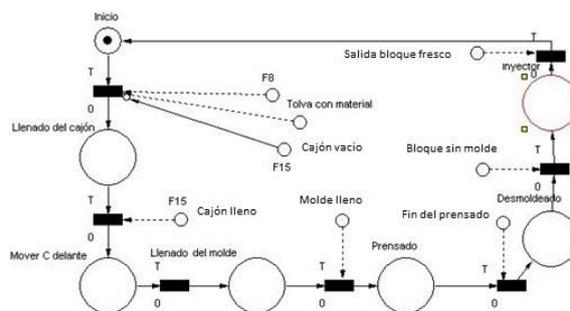


Figura 7. Diagrama de estados en Redes de Petri GHENeSys de la secuencia de prensado de bloques de construcción

El cuarto macrolugar de la Figura 7 (Prensado) es el que engloba las funciones de controlar la presión de prensado y ciclo de vibraciones que son las acciones básicas de control de calidad en esta sección. El agente gestor de calidad adjunto al supervisor de prensado de las metas 1.3 y 1.3.1 (Figura 3) se ocupa de ajustar los mejores valores para el controlador PI de prensado y para los tiempos y secuencias de vibraciones. Se realimenta de forma manual por los operadores la valoración de la calidad de los bloques frescos obtenidos, considerando una partición borrosa desde muy quebradizos y secos hasta muy suaves y húmedos y el agente modifica los valores de los controles de presión y vibración buscando la mejor calidad. Si están secos y quebradizos debe incrementarse la presión ligeramente y reducir las vibraciones, lo contrario si son suaves y húmedos (ver Figura 8).

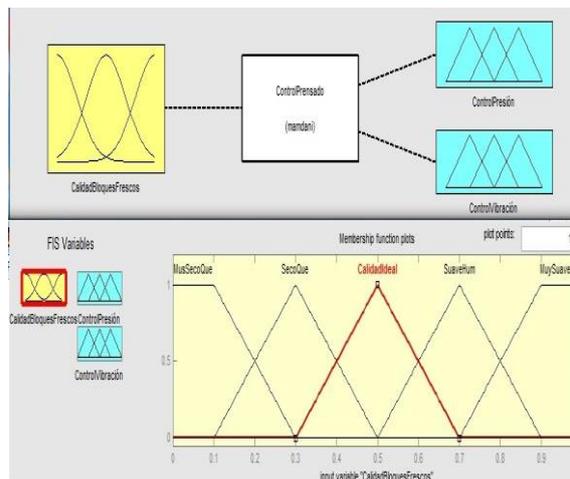


Figura 8. Diseño del controlador supervisor borroso para reajustar los controles de presión y vibraciones en el prensado.

3.3 Transporte y curado

Como se muestra en la tercera columna de la figura 2, también se diseñó la supervisión del transporte y curado. En esta etapa el problema central que afecta la calidad es el transporte de bloques frescos.

Esta sección se descompuso en las siguientes etapas:

1. Recogida de los bloques frescos.
2. Salida a la plataforma.
3. Búsqueda de la celda de entrega
4. Recorrido en la celda de entrega de bloques frescos.
5. Salida a la plataforma.
6. Búsqueda de la celda de recogida de bloques secos.
7. Recorrido en la celda de recogida de bloques secos.
8. Salida a la plataforma
9. Búsqueda del descenso.
10. Entrega de los bloques secos.
11. Salida a la plataforma.
12. Posicionamiento frente al ascensor.

La secuencia del funcionamiento automático del Sistema de Control Automatizado propuesto está representada en la Fig. 9. Un problema inicial de la automática local fue el reinicio de la secuencia en alguna de las etapas intermedias, lo cual fue resuelto mediante el agrupamiento de las 12 etapas en cuatro como indica la figura.

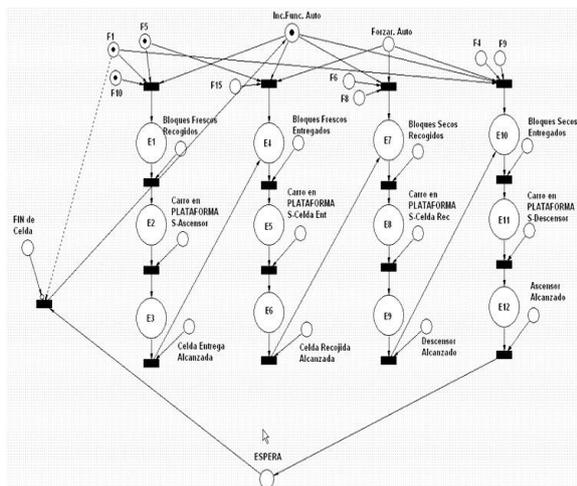


Figura 9. Diagrama de estados en Redes de Petri GHENeSys del funcionamiento automático del transporte y curado

Las primeras cuatro etapas se realizan con bloques frescos, por esto el trabajo del multiforca (transportador) es muy importante. Aquí se decide la calidad del bloque con la garantía de un movimiento suave sin vibraciones ni choques bruscos. Por esto se trabajó en el modelado del control de velocidad del multiforca utilizando redes de Petri híbridas (Silva, 2007). En la etapa correspondiente a la recogida de los bloques frescos se van a generar inicialmente dos eventos antes de cargar los bloques frescos, los que serán: desplazamiento del carro transportador hacia delante y desplazamiento de los brazos del carro transportador hacia arriba. Estos no requieren de un control

continuo de los movimientos porque el carro está vacío y se ajustan solo dos velocidades (lenta y rápida). Luego para el retroceso, si ya están los bloques frescos sobre el carro y se requiere ir incrementando suavemente la velocidad por medio del ajuste de la referencia al variador de frecuencia desde el controlador programable, y luego el proceso inverso hasta el frenado en la nueva posición. En la figura 10a se representa en redes de Petri híbridas (Silva, 2007) el modelo del sistema y en la 10b los resultados de las simulaciones obtenidas con el SimHPH (Julves, 2011).

El supervisor solamente reajusta el valor de las pendientes de las curvas de aceleración y desaceleración en dependencia de los modelos de bloques y tipos de materiales utilizados. El control es convencional dentro del CLP del Multiforca. Esto se realiza mediante la entrada del tipo de bloque desde un selector en la HMI y una tabla de selección de las velocidades requeridas para los cuatro tipos de moldes de bloques de construcción. Por esto no fue necesario construir un regulador difuso, quedando la inteligencia de este agente supervisor resumida a una selección convencional a partir de la experiencia almacenada en un arreglo. Dentro del PLC están programadas las cuatro variantes en bloques funcionales que se activan según la acción del supervisor.

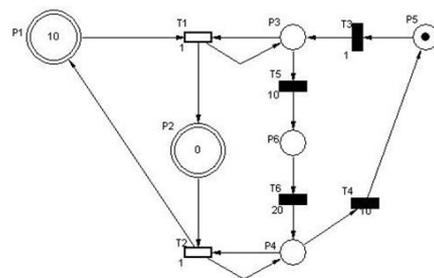


Figura 10a. Red Híbrida de Incremento/Decremento de la referencia de velocidad del carro representada en el marcado del lugar P2

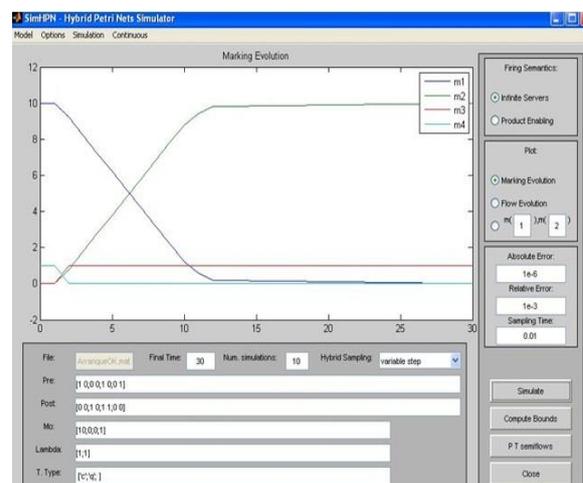


Figura 10b. Comportamiento del marcado mediante SimHPN de la Red Híbrida de incremento continuo y suave de la referencia de velocidad del carro transportador de bloque frescos durante el arranque

2.4 Empaquetado

Para esta sección se realizó la concepción general de la automatización con la siguiente estructura:



Figura 11. Subprocesos y lógica de automatización local en empaquetado de bloques de construcción.

Las tres etapas del proceso definen tres lógicas asociadas a su automatización local y el supervisorio (SCADA) mantiene la sincronización del funcionamiento automático de toda la sección de empaquetado. Esto corresponde a las metas de supervisión del empaquetado (1.5 en Figura 2) que incluyen la parte convencional de funcionamiento del mímico, alarmas, tendencias y reportes (1.5.1, 1.5.3, 1.5.4, 1.5.5 en Figura 2). La configuración del empaquetado (1.5.2 en Figura 2) se concentra en la selección de las diferentes formas de empaquetado de los cuatro tipos de bloques de construcción que fabrica la industria.

El trabajo del empaquetado es puramente secuencial, lo que se realizó el ajuste preciso de los movimientos del manipulador de forma a evitar el sobrepaso de la velocidad máxima de movimiento y garantizando el agarre firme de los grupos de bloques a empaquetar. Por esto sólo fue requerida la selección del tipo de empaquetado unido a un sistema de vigilancia y protecciones automáticas instalado en el agente supervisor de esta sección.

A partir de esto se elaboraron los modelos en Redes de Petri extendidas GHENeSys de las tareas definidas para los roles obtenidos en las otras etapas del diseño mediante la metodología MaSE. A cada modelo se le realizó la verificación de propiedades funcionales de vivacidad, limitabilidad, y alcanzabilidad, obteniendo buena formación del modelo. Luego se realizó la validación de los requerimientos funcionales mediante simulación en el VON2.7. Con esto se garantizó una programación eficiente y segura del PLC y el supervisor de dicha sección.

De esta forma queda completado el diseño de todo el sistema de supervisión y control local de la fábrica de bloques de construcción de Santiago de Cuba. Este proyecto se realizó en colaboración entre la Universidad de Oriente y la empresa, pero con el apoyo de la EP-USP (Sao Paulo, Brasil) y la UniZar (Zaragoza, España).

Todo lo anterior demuestra las ventajas del modelado UML-PN basado en metodología MaSE modificada y su efectividad en la integración de la inteligencia distribuida en los sistemas de supervisión de una fábrica de bloques de construcción para elevar la calidad y productividad de la empresa. A esta toma

de decisiones se le integrará en una segunda etapa la concurrencia de fallos y ciclos de mantenimiento preventivo que también incrementará la productividad y eficiencia de la empresa.

El trabajo se encuentra en fase de proyecto y simulación para ser entregado a la empresa de materiales de la construcción de Santiago de Cuba antes de finales del 2014. Se incluyen 3 tesis de maestría ya concluidas sobre la automática local de las secciones de tres secciones de la planta y una tesis de doctorado en desarrollo para el diseño e implementación del supervisorio inteligente.

En este trabajo quedan resumidas las estrategias de control de calidad de los cuatro agentes supervisores de las cuatro secciones de la planta diseñados mediante la integración de la metodología MaSE y las Redes de Petri junto con el diseño de controladores difusos. La MaSE aportó las facilidades para la concepción general del sistema y la repartición de tareas y roles entre cada una de las partes de la automatización integrada. Las redes de Petri permitieron estudiar la dinámica de las tareas principales buscando consistencia estructural y funcional por medio de la verificación de propiedades de los modelos y luego su validación simulada para garantizar el cumplimiento de los requerimientos de diseño. La teoría y herramientas de diseño de controladores difusos permitieron la formalización de la experiencia de operadores y especialistas para concretar las acciones de toma de decisiones en las secciones principales que garantizan la calidad de los bloques de construcción fabricados.

Con todo esto quedan las bases para la etapa de adición de los agentes inteligentes para las tareas ante fallos y mantenimiento preventivo que completaran el sistema supervisorio multiagente de la planta. En esta etapa se concretaran las conversaciones entre agentes para lograr la concurrencia de estas nuevas funciones con las ya implementadas.

4 Conclusión

El diseño de un sistema supervisorio multiagente en la fábrica de bloques de construcción permite elevar la calidad y productividad de la empresa porque independiza la toma de decisiones de la experiencia de cada operador, de su destreza y agudeza en la valoración de los factores existentes. Además ya quedan sentadas las bases para incorporar fácilmente al diseño la concurrencia con funciones de tolerancia a fallos y mantenimiento preventivo de cada sección de la empresa.

La aplicación demuestra la efectividad de la metodología MaSE modificada (UML-PN) en el diseño de estos sistemas multiagentes para automatización integrada, así como su combinación con el uso de inteligencia difusa en la construcción de los agentes distribuidos en las cuatro secciones de la planta, lo

cual puede ser utilizado en otras aplicaciones similares de automatización.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo de los grupos de investigación científica DesignLab de la Universidad de Sao Paulo (Brasil) y el Grupo de Ingeniería de Sistemas de Eventos Discretos de la Universidad de Zaragoza (España) en la realización de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Bailey, D. & Wright, E. (2003) Practical SCADA for Industry, Edit. Elsevier. Great Britain.
- Bauer, B., Müller, J.P., Odell, J. (2001) Agent UML: A Formalism for Specifying Multiagent Interaction, *Agent-Oriented Software Engineering*, Paolo Ciancarini and Michael Wooldridge eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 91-103.
- Benitez, I., Silva, JR., Villafruela, L., Gomis, O., Sudriá, A. (2008) Modeling extended Petri nets compatible with GHENeSys IEC61131 for industrial automation. The Int. Journal of Adv. Manuf. Techn. Vol 36, Nu 11-12 / April08. Springer London.
- Benitez, I, Gomis, O. Lamothe, O (2013). Agentes Inteligentes aplicados a los sistemas de supervisión de procesos. Convención Científica internacional Informática 2013. Habana,Cuba.
- Brenan, R. (2007) Toward Real-Time Distributed Intelligent Control: A Survey of Research Themes and Applications. IEEE Trans. on Syst., Man, And Cyb. Part C, Vol. 37, No. 5, Sept.
- Caire, G. (2001) MESSAGE: Methodology for Engineering Systems of Software Agents Initial Methodology. In: Technical report, EDIN 0224-0907, Project P907, EURESCOM 2001.
- Choren, R., Lucena, C. (2005). Modeling Multi-agent systems with Anote. *Softw Syst Model* (2005) 4: 199–208.
- Colombo, A. W., R. Schoop and R. Neubert (2006). An Agent-Based Intelligent Control Platform for Industrial Holonic Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 1, pp. 322-337
- Fernandes, J.M. & Ribeiro, O.R. (2009). Validation of Scenario-based Business Requirements with Coloured Petri Nets. *Proc. ICSEA '09*. pp 250–255.
- Godoy, M., Shaw, I. (2007). Controle e modelagem Fuzzy. Editora Blucher-FAPESP. São Paulo, Brasil.
- Han, W; Jafari, M. (2003) Component and Agent-Based FMS Modeling and Controller Synthesis. *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cyb. Part C, V. 33, N. 2, May03*, pp. 193-206.
- Jennings N.R., Bussmann, S. (2003) Agent Based Control systems. *IEEE Control Syst. Mag.* June03, V. 23, pp.61-73.
- Julves, J, Mahulea, C., Vazquez, CR. (2011). Analysis and simulation of manufacturing systems using SimHPN toolbox. *IEEE International Conference on Automatic Science and Engineering*. Trieste, Italy, August 24-27, 2011.
- Juchem, M, Bastos, R.M. (2001) Arquitecturas de Agentes. *Technica Report Series. N.13*. PUCRS, Porto Alegre, Brazil, April, 2001
- Kavi, K.M., Aborizka, M., Kung D. (2002). A Framework for Designing, Modeling and Analyzing Agent Based Systems. *Proc. ICA3PP'02*, pp. 23-25. *IEEE Computer Society*, pp. 196 – 200.
- Leitao, P. (2009) Agent-based distributed manufacturing control: A state of the art survey. *Eng. Applic. of Artif. Intell.* 22, pp. 979–991.
- Marik, V. McFarlane, D (2005) Industrial adoption of Agent-Based Technologies, *IEEE Computer Jan-Feb05* pp. 27-35
- Mending, J. (2009) Empirical Studies in Process Model Verification. K. Jensen and W. van der Aalst (Eds.): *ToPNoC II, LNCS 5460*, pp. 208–224, 2009. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Mora, M., Lopes, J.G., Viccari, R.M., Coelho, H. (1999). BDI Models and Systems: Reducing the Gap. *JPMuller et al (Eds.): ATAL8, LNAI 1555*, pp.11-27, 1999. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg.
- Shen, W.; L. Wang y Q. Hao. (2006) Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: A state of the art Survey. *IEEE Trans. on Syst., Man and Cyb. V.36, N. 4, July06*.
- Silva, M., Recalde, L. (2007). Redes de Petri continuas: expresividad, análisis y control de una clase de sistemas lineales conmutados. *RIAI Journal*, Vol. 4, Num. 3, Julio 2007, pp. 5-33.
- Silva, V., Choren, R. and Lucena. C. (2008). Modeling MAS Properties with MAS-ML Dynamic Diagrams. *LNAI 4898*, pp. 1–18.
- Trappey, A.J.C.; Hsiao, D.W.; Lin Ma; Yu-Liang Chung; (2009) Maintenance chain integration using Petri-net enabled Prometheus MAS modeling methodology. *Proc. of 13th CSCWD*, 238 – 245.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R., and Kinny, D. (2000): The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* (2000): pp. 285-31.
- Wood, M.F., DeLoach S.A. (2001). An overview of Multiagent systems Engineering Methodology. *Proc. of First Int.I Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*. June 2000, Ireland. LNCS Vol. 1957. Springer Verlag, Berlin, January 2001.