

Programación, Reprogramación y Supervisión de la Producción Bajo el Paradigma Holónico y la Teoría de Control Supervisorio

Germán Zapata Madrigal
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín
Facultad de Minas
Medellín, Colombia
gzapata@unal.edu.co

Edgar Chacón
Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Mérida, Venezuela
echacon@ula.ve

Resumen— Las arquitecturas para el control de la producción muestran una tendencia hacia la utilización de sistemas autónomos y distribuidos, con el fin de tener procesos ágiles y flexibles que respondan rápidamente a los cambios del entorno. Entre estos nuevos paradigmas se pueden mencionar los sistemas de producción holónicos. Para lograr la agilidad y flexibilidad, estos sistemas necesitan funciones de coordinación y supervisión distribuidas, lo que les permite reconfigurar la estructura de producción y las leyes de control para acomodarse a las nuevas condiciones operativas. La selección de una nueva configuración es básicamente un problema de alcanzabilidad de estados en sistemas de dinámicas discretas, por lo que las redes de Petri (PN) y la teoría de control supervisorio (SCT) han resultado apropiadas para encontrar soluciones que tengan un buen desempeño en tiempo real. En este trabajo se presenta una propuesta para aplicar estos conceptos, que se basa en modelos de redes de Petri de Unidades de producción holónicas y técnicas de control supervisorio para la programación, reprogramación y supervisión de la producción de una planta de generación térmica de ciclo combinado.

Palabras claves- Programación de la producción; reprogramación de la producción; sistemas de producción continuos; sistemas holónicos de producción; redes de petri; teoría de control supervisorio.

I. INTRODUCCIÓN

Las tendencias actuales en el control de producción, entre ellas la manufactura inteligente (IMS) y la manufactura holónica (HMS), están orientadas a tener sistemas que respondan rápidamente a las perturbaciones propias del entorno productivo. Esta tendencia ha generado un volumen importante de investigaciones y trabajos orientados a ofrecer sistemas de control, supervisión, programación y reprogramación de la producción que respondan a esas exigencias.

La dinámica propia de los ambientes de producción, caracterizada por demandas cambiantes de los clientes, variabilidad de los procesos, perturbaciones en el piso de planta, como fallas de los recursos, pérdidas de capacidad de

los mismos, problemas con la calidad del producto, desviaciones en los tiempos de proceso estimados; cambios en las órdenes de producción, debidos a la llegada de pedidos más urgentes, cancelación de pedidos o cambios en las prioridades de órdenes ya programadas, entre otras, tienen un impacto importante sobre la ejecución del Plan de producción programado, creando la necesidad de contar con sistemas de control de producción con un alto grado de adaptabilidad, flexibilidad operacional y con la habilidad de transformar su estructura interna y tecnológica cuando se requiera. El paradigma holónico ha resultado muy apropiado para cumplir con estos requerimientos.

El enfoque holónico (HMS) guarda un equilibrio entre distribución del conocimiento y las decisiones y la centralización del control y la optimización, combinando adecuadamente los esquemas de control jerárquico y heterárquico, tomando las ventajas de cada uno y resolviendo sus falencias. Los holones que conforman un HMS se organizan en jerarquías temporales reconfigurables llamadas *Holarquías*, mediante las cuales se provee la flexibilidad y adaptabilidad del esquema heterárquico, reaccionando ágilmente a perturbaciones y preservando la estabilidad del jerárquico, con capacidades para garantizar estabilidad, predictibilidad y optimización global. Así, el paradigma holónico puede satisfacer requerimientos de flexibilidad y adaptabilidad mientras conserva la estabilidad.

Un sistema holónico tiene como atributos básicos: la autonomía, la proactividad, la cooperación y la reactividad. Se caracterizan también porque su comportamiento está orientado por objetivos, tienen múltiples, complejos y dinámicos dominios de cooperación y responden rápidamente a situaciones que pongan en riesgo el objetivo, tanto que se han definido como “*sistemas formados por entidades autónomas que cooperan de manera proactiva para alcanzar objetivos comunes*”.

En un sistema holónico las funciones se descentralizan y así, cada holón tiene la habilidad para planear, programar, supervisar y controlar sus operaciones y las reprograma de acuerdo con los cambios que se presenten.

El trabajo que se presenta, da lugar a una propuesta para la programación, reprogramación y supervisión de la producción en un sistema de producción continuo, inspirada en el paradigma holónico y apoyado en las redes de Petri y la teoría de control supervisorio.

El documento está estructurado como sigue. En la segunda parte se relacionan investigaciones que han resuelto el problema de la configuración en tiempo real, resaltando algunas que lo hacen desde el paradigma holónico o las que hacen uso de las PN y SCT. Los conceptos teóricos acerca de estos temas se presentan en la tercera parte.

La descripción de la propuesta se hace en la cuarta parte y en la parte final se presenta el ejemplo de aplicación en una central térmica de ciclo combinado.

II. TRABAJOS PREVIOS

Sólo fue hasta 1989 que el concepto de Holón propuesto por Koestler en 1968, fue aplicado para los sistemas de manufactura. En su trabajo, Suda plantea una propuesta “plug and play” para diseñar y operar sistemas de manufactura que combinaran el desempeño global óptimo con la robustez frente a las perturbaciones, dando origen a lo que se ha denominado Sistemas de Manufactura Holónicos (HMS) [1]. Como concepto, HMS representa una metodología, herramientas y normas para el diseño de sistemas de control de manufactura flexibles y reconfigurables. Sin embargo, el enfoque holónico también se aplica en la actualidad a otro tipo de sistemas, como tráfico aéreo, salud, defensa [2], energía, telecomunicaciones, robótica, biología, administración y negocios, logística, entre otros [3].

Los resultados de veinte años de investigaciones por parte de Rockwell Automation en el tema de holones y agentes en manufactura se presentan en [2] las que incluyen automatización de embarcaciones, fabricación de semiconductores; robots de ensamble, fabricación de acero, sistemas de manejo de materiales, plantas de tratamiento de aguas. En la misma publicación se presenta como elemento básico de la arquitectura holónica de Rockwell, la denominada *Plantilla de agente holónico*, la cual es una clase en el sentido del diseño orientado por objetos, que representa un agente de manufactura dentro de dicha arquitectura y fue implementada en PLCs de la serie ControlLogix.

El problema de las configuraciones para programación y reprogramación de la producción en sistemas holónicos ha sido abordado en profundidad en [4-8]

Una revisión sobre los trabajos el planeamiento distribuido y programación de holones reconfigurables se puede consultar en [6, 9, 10], proponen una arquitectura distribuida

basada en el paradigma holónico, para el control reconfigurable de operaciones en procesos continuos. La propuesta distribuye las funcionalidades de planificación, programación, coordinación y control.

En plantas de generación, [11] propone una arquitectura híbrida para un sistema de control supervisorio, compuesto por tres niveles, en la que los niveles superiores están gobernados por un conjunto reconfigurable de decisiones discretas.

Las PN se han ganado la atención para resolver el problema de programación y reprogramación de la producción tanto en sistemas discretos, como en procesos continuos y batch [12-18]. Las características propias de los modelos en PN han llevado a muchos autores a plantear la reconfiguración como un problema de control supervisorio [19].

Soluciones desde este enfoque, que elaboran un modelo compuesto de productos y recursos mediante PN y que realizan la síntesis desde la teoría de control supervisorio mediante análisis del árbol de alcanzabilidad se encuentran en [14, 17, 20-24].

III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. Redes de Petri como generadoras de lenguaje

Las Redes de Petri (PN) son una herramienta matemática y gráfica que permite modelar, simular y controlar Sistemas de eventos discretos (DES) [14, 25].

Una red de Petri se puede presentar por una tupla de la forma $R = \langle P, T, A, B \rangle$ donde P es el conjunto de estados del sistema, T es el conjunto de todas las transiciones, A es la matriz de incidencia previa, representa un arco dirigido de p_i a t_j de peso $a(p_i, t_j) \in \mathbb{N}$, B Matriz de incidencia posterior, representa un arco dirigido de t_j a p_i con peso $b(p_i, t_j) \in \mathbb{N}$.

Las redes de Petri como generadoras de lenguajes o etiquetadas [26], son apropiadas para sintetizar el supervisor desde la propuesta de Ramadge y Wonham, ya que pueden ser transformadas a autómatas de estados finitos mediante el árbol de alcanzabilidad [27-29].

Una PN etiquetada es un tupla $N = \langle P, T, F, l \rangle$ donde P y T tienen el mismo significado que en el caso anterior, $F \subseteq \langle P \times T \rangle \cup \langle T \times P \rangle$ es el conjunto de arcos y l es una etiqueta que asigna a cada transición un evento $l: T \rightarrow 2^\Sigma \cup \{\epsilon\}$ donde $\Sigma = \sum_c \cup \sum_{nc}$ y ϵ es un evento silencioso.

Un vector de marcaje es $M : P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$ que asigna a cada lugar un número entero no negativo de marcas. La red (N, M_0) es una red marcada con marcaje inicial M_0 . La notación $M_0 \xrightarrow{\sigma} M$ se utiliza para expresar que el disparo de σ en el marcaje M_0 lleva a M .

Formalmente el autómata equivalente de una red (N, M_0) puede ser expresado como $G = \langle Q, \Sigma, \delta, \Gamma, q_0, Q_m \rangle$, con $Q = R(N, M_0)$ es decir, todos los estados alcanzables en la red de Petri N a partir de M_0 ; $\Sigma = U_{t \in T} l(t) \setminus \{0\}$, δ tal que $M' \in \delta(M, \sigma)$ si y solo si $M \xrightarrow{\sigma} M'$ y $\sigma \in l(t)$, obteniendo así el grafo de alcance de (N, M_0) expresado como autómata. Σ^* son todas las posibles cadenas finitas de elementos que pertenecen a Σ incluyendo el evento silencioso.

Ahora bien, la unión entre las redes de Petri y los lenguajes se da mediante las siguientes definiciones. La primera es el Lenguaje marcado o lenguaje terminal de G , que se denota como $L_m(G)$ y es el conjunto de las secuencias de disparos que llevan la red a una estado final, así $L_m(G) = \{ \sigma \mid M_0 \xrightarrow{\sigma} M_f \in F \}$.

La segunda es el lenguaje generado de G , que es el conjunto de cadenas generadas por los disparos para alcanzar un marcaje M , así $L(G) = \{ \sigma \mid M_0 \xrightarrow{\sigma} M \geq M_f \in F \}$.

El objetivo de la teoría de control supervisorio con respecto al lenguaje es poder crear un lenguaje tal que se halle un lenguaje controlable y no bloqueante de la forma $L(S/G)$, es decir el lenguaje de la composición de la planta $G = \langle Q, \Sigma, \delta, \Gamma, q_0, Q_m \rangle$ y del supervisor $S = \langle Q_s, \Sigma_s, \delta_s, \Gamma_s, q_{0s}, Q_{ms} \rangle$. Para poder deshabilitar eventos y habilitar los estados deseados se hace llamado a lo siguiente, $\Gamma_{GXS}((q, q_s)) = \Gamma(q) \cap \Gamma(q_s)$.

Si a una planta se le va a determinar un supervisor es necesario definirle unas especificaciones, es decir, la trayectoria deseada. De modo formal las especificaciones son un lenguaje $K \subseteq L(G)$, luego se debe encontrar un supervisor tal que en el lazo cerrado $L(S/G) = K$. Se

puede decir que el lenguaje k es controlable con respecto a G si $\bar{K} \sum_{nc} \cap L(G) \subseteq \bar{K}$.

B. Sistemas de producción holónicos (HPS)

A partir del concepto de que un sistema holónico está compuesto por “entidades autónomas que cooperan de manera proactiva para alcanzar metas comunes”, se han construido propuestas, plataformas y arquitecturas para sistemas de producción que aparecen como una respuesta a los retos impuestos a la industria de hoy de adaptarse rápidamente a los cambios y perturbaciones del entorno.

El consorcio HMS (HMS, 2004) define un holón como: “un componente constitutivo, autónomo y cooperativo, de un sistema de manufactura, cuyo fin es transformar, transportar, almacenar y/o validar información u objetos físicos”.

Los atributos holónicos como: la autonomía; la cooperación y la proactividad; la capacidad del holón de responder a las perturbaciones; el manejo de la complejidad mediante estructuras autosimilares, exitosamente implementadas por la programación orientada a objetos y la distribución de inteligencia contenida en la concepción *holónica*, están generando un cambio en las arquitecturas de control, que van migrando desde las arquitecturas jerárquicas hacia las estructuras holárquicas, las cuales combinan optimización global con respuesta ágil ante perturbaciones.

IV. MODELOS APLICADOS EN UNA CENTRAL TÉRMICA

A. Descripción del proceso de una central térmica de ciclo combinado

Una central térmica de ciclo combinado es un proceso termodinámico que tiene como fin la producción de energía eléctrica a través de dos ciclos diferentes. El primero es un ciclo abierto de gas que tiene como entradas aire y combustible. El segundo es un ciclo cerrado de vapor de agua que toma los gases producto del primer ciclo y mediante una caldera de recuperación de calor (HRSG) pasa agua de líquido saturado a vapor sobrecalentado.

La configuración básica de una central de ciclo combinado se muestra en la “Fig. 1”.

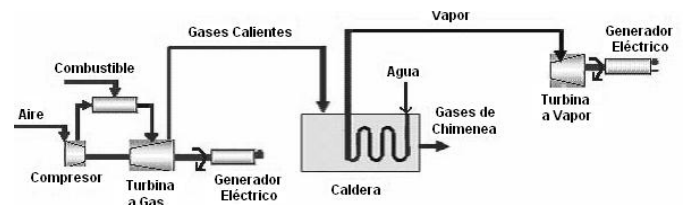


Figura 1. Central de ciclo combinado, Tomado de [30]

Para aplicación realizada, se ha seleccionado una configuración 4x2 (cuatro turbinas de gas por dos turbinas de vapor).

Los modelos para la programación, reprogramación y supervisión de la producción de un holón, se construyen mediante la composición de modelos de PN, que combinan las competencias del recurso, su disponibilidad, los productos que puede producir y las conexiones entre los recursos de producción.

Para el modelo del producto se utilizan los P-Graph [10], que se traducen a un modelo en PN. La "Fig. 2(a)" ilustra el grafo del producto para la generación de energía y en la figura 2(b), la respectiva red de Petri. En la "Fig. 3" y "Fig. 4", se representan el modelo del recurso y el modelo compuesto de la Unidad de Producción Holónica (UPH), respectivamente.

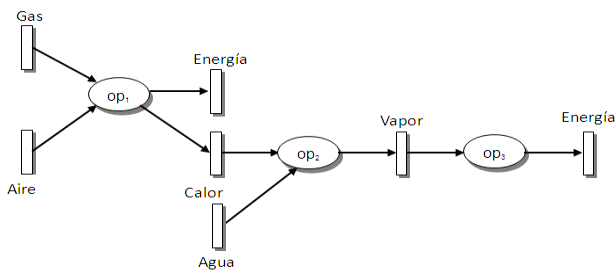


Figura 2 (a). P-Graph del producto

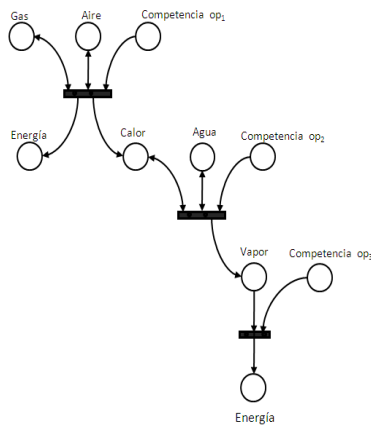


Figura 2 (b). Red de Petri del producto

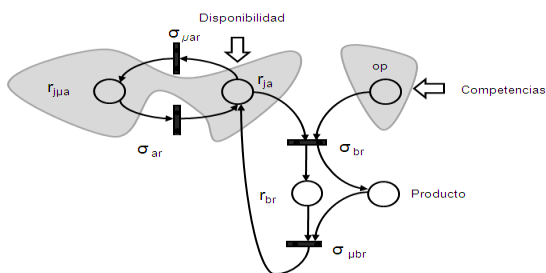


Figura 3. Modelo del recurso

La técnica para realizar la composición y obtener una PN global de la UPH, se describe en detalle en [31]. Una vez se tiene el modelo global de la unidad de producción, se elabora el árbol de alcanzabilidad para la condición operativa declarada por los holones en el proceso de negociación de la misión. Las trayectorias que conducen desde el estado inicial hasta el estado final forman el lenguaje marcado y ese conjunto permite establecer todas las configuraciones posibles que puede organizar la UPH para ejecutar el objetivo de producción negociado.

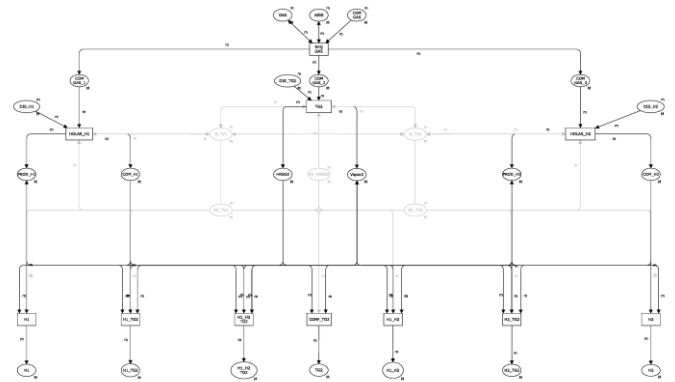


Figura 4. Composición Recurso/Producto/Conexiones

Una vez se tienen las configuraciones, se ejecutan algoritmos de optimización para seleccionar la que mejor satisface los criterios establecidos. Las configuraciones también permiten formar las holarquías que tendrán la autonomía para adelantar la misión, como se explica en [31]. Seleccionada la configuración, se establece el árbol de alcanzabilidad con retardos, el cual lleva una etiqueta de tiempo en cada uno de los arcos, indicando la duración de cada una de las operaciones. Este árbol permite determinar la secuencia de las operaciones y obtener finalmente el plan de producción para una condición operativa.

Las holarquías formadas conforman a su vez una UPH y para ellas se crea un modelo global de la holarquía, siguiendo los mismos principios de construcción mediante PN. El nuevo modelo obtenido permite realizar la reprogramación de la producción cuando se presentan perturbaciones.

V. APLICACIÓN

Para ejecutar las funciones de programación y reprogramación de la producción en una central térmica, se ha desarrollado un aplicativo informático basado en el paradigma holónico y la teoría de control supervisorio, el cual se describe brevemente a continuación.

A. Descripción del aplicativo desarrollado

Para la demostración de las características y propiedades holónicas mencionadas a lo largo de este trabajo, se desarrolló un prototipo de software denominado "TERMOLOCHA". El término "LOCHA" viene de la expresión "Low Cost Holonic

Architecture” y se refiere a la arquitectura holónica propuesta como resultado de esta investigación.

Algunas consideraciones y restricciones operacionales definidas en el aplicativo son:

- Cada una de las turbinas, sea de gas o de vapor es considerada un holón.
- Existen nueve tramos de tuberías que representan las conexiones entre las calderas y las turbinas de vapor, las cuales pueden ser habilitadas y deshabilitadas para una determinada misión, según su condición operativa.
- La capacidad máxima de generación de una turbina de vapor está dada por la mitad de la suma de las capacidades de las turbinas de gas que la alimentan.
- Como consecuencia de las restricciones temporales en los arranques de las turbinas de gas y las turbinas de vapor, en los dos primeros periodos de programación de la misión sólo se tienen en cuenta las turbinas de gas.
- Cada turbina de gas tiene asociado un costo de arranque que fue configurado globalmente en USD 5.000.

En la “Fig. 5” se aprecia la vista principal del software, en la que se destacan los siguientes componentes: Arquitectura de la UP, Programación de la producción y Supervisión.

Además, cuenta con una consola que informa los diferentes eventos que ocurren en la central.



Figura 5. Vista principal de TERMOLOCHA

El sistema inicia en la pantalla de “Arquitectura de la UP”, en la que se realiza la configuración inicial de los holones, los recursos y las conexiones, estableciendo su disponibilidad o no disponibilidad. A partir de esta configuración se define el marcaje inicial para la negociación de las misiones.

El conocimiento de cada holón o *Ingeniería del holón*, se edita haciendo uso del botón “Edición de recursos” .

Mediante la edición de los recursos se facilita la modificación de los distintos valores que intervienen en la elaboración de las propuestas para la negociación.

Una vez establecido el estado de la UPH y los valores para la presentación de ofertas, se puede proceder a la planificación y programación de la producción, iniciando el proceso de negociación en la pestaña “Programación” como se muestra en la “Fig. 6”.

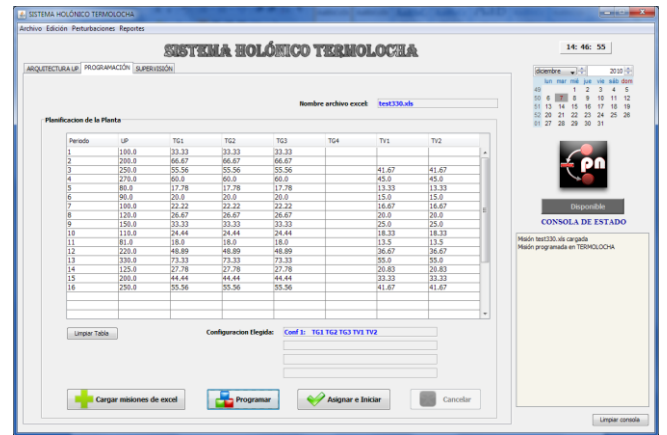


Figura 6. Pestaña para programación de la producción

Se dispone de cuatro botones para adelantar este proceso: “Cargar misiones de Excel”, “Programar”, “Asignar e iniciar”, “Cancelar”.

Finalmente, en la pestaña “Supervisión” se encuentra la información relevante del proceso en ejecución tanto de la unidad de producción, las holarquías formadas y los recursos individuales. En la “Fig. 7” se observa cómo esta pestaña está conformada por tres paneles principales. El primero es el recurso, donde se muestran los parámetros asociados y el estado del recurso físico, donde además se cuenta con la posibilidad de navegar entre los elementos pasando por holarquías hasta llegar a los holones individuales. El segundo panel se refiere a la información de cada misión asignada a un determinado recurso, mostrando el estado de la misión actual, el porcentaje de avance y la gráfica de potencia generada para todos los periodos asignados.

En el último panel, se encuentra el módulo de perturbaciones que permite ingresar tres tipos de eventos: fallar recurso, degradar recurso y nueva misión. Cualquiera de estos tres eventos desencadena la ejecución del algoritmo de renegociación que realiza una nueva asignación para responder al cambio ocasionado por la perturbación y asegura que se cumpla con el objetivo negociado por la central térmica.

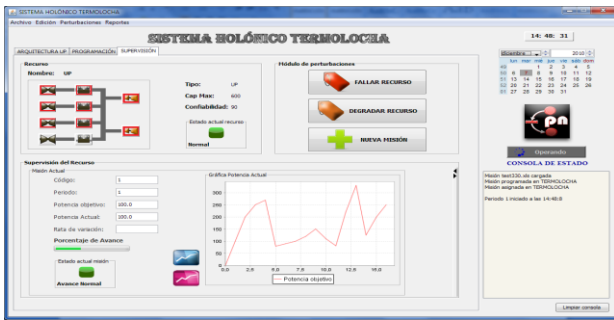


Figura 7. Pestaña para la supervisión.

Luego de elegir una de las tres opciones, el algoritmo de reprogramación realizará una nueva configuración y distribución en los recursos donde se actualizará la tabla de la pestaña de programación. En caso de que la capacidad total no sea suficiente para suplir la demanda con cualquiera de los eventos ingresados, el software da la opción de renegociar la misión, es decir, de trabajar con la capacidad permitida en ese momento y el usuario deberá elegir si opera bajo esa modalidad o no.

RECONOCIMIENTOS

El contenido de este trabajo, es producto de las actividades de investigación desarrolladas dentro de la tesis de doctorado "Propuesta para la planificación, programación y supervisión de la producción desde el enfoque holónico y la teoría de control supervisorio", dirigida por el Dr. Edgar Chacón y matriculada en el programa de doctorado en Ciencias Aplicadas de la Universidad de los Andes, Mérida Venezuela. La investigación recibió financiación de Colciencias dentro del proyecto "Aplicabilidad del modelo de integración holónico en sistemas a eventos discretos granulares con observabilidad limitada".

REFERENCES

[1] H. Suda, "Future Factory System Formulated in Japan," Japanese Journal of Advanced Automation Technology, vol. 1, 1989.

[2] P. Vrba, et al., "Rockwell Automation's Holonic and Multiagent Control Systems Compendium," Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 14-30, 2011.

[3] P. Mella, The Holonic Revolution: Holon, Holarchies and Holonic Networks The Ghost in the Production Machine, VIII ed. Pavia: Pavia University Press, 2009.

[4] C. Ramos, "A holonic approach for task scheduling in manufacturing systems," in Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on, 1996, pp. 2511-2516 vol.3.

[5] P. Sousa and C. Ramos, "A dynamic scheduling holon for manufacturing orders," Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 9, pp. 107-112, 1998.

[6] N. N. Chokshi and D. C. McFarlane, A Distributed Coordination Approach to Reconfigurable Process Control. Hardcover: Springer, 2008.

[7] L. Bongaerts, "Integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems," 1998.

[8] L. Ong, "An Investigation of an Agent-Based Scheduling in Decentralised Manufacturing Control," M.Phil. in Engineering, Department of Engineering, University of Cambridge, 2003.

[9] D. C. Mcfarlane and S. Bussman. (2000) Developments in holonic production planning and control. Production Planning & Control.

[10] N. Chokshi and D. McFarlane, "A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations," Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 19, pp. 215-232, 2008.

[11] H. E. Garcia, et al., "A reconfigurable hybrid system and its application to power plant control," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 3, pp. 157-170, 1995.

[12] G. Tuncel and G. Bayhan, "Applications of Petri nets in production scheduling: a review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 34, pp. 762-773, 2007.

[13] M. Ghaeli, et al., "Petri-net based formulation and algorithm for short-term scheduling of batch plants," Computers & Chemical Engineering, vol. 29, pp. 249-259, 2005.

[14] M. Tittus and K. Akesson, Petri Net Models in Batch Control, 1999.

[15] M. Tittus and B. Lennartson, "Hierarchical supervisory control for batch processes," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 7, pp. 542-554, 1997.

[16] M. Zhou, Petri nets in Flexible and agile Automation, 1995.

[17] G. a. M. D. Music, Petri Net Based Supervisory Control of Flexible Batch Plants vol. Vol. II: Prepr. 8 th IFAC Symp. on Large Scale Systems: Theory & Application, Rio Patras, 1998.

[18] H. Fu-Shiung, "Collaborative timed Petri net for holonic process planning," in American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003, 2003, pp. 344-349 vol.1.

[19] P. J. G. Ramadge and W. M. Wonham, "The control of discrete event systems," Proceedings of the IEEE, vol. 77, pp. 81-98, 1989.

[20] K. Akesson, "Methods and Tools in Supervisory Control Theory," Thesis For The Degree of Doctor of Philosophy.

[21] J.-F. Pétrin, et al., "Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell," Control Engineering Practice, vol. 15, pp. 595-614, 2007.

[22] P. Falkman, et al., "Specification of a batch plant using process algebra and petri nets," Control Engineering Practice, vol. 17, pp. 1004-1015, 2009.

[23] B. Lennartson, et al., "Control architecture for flexible production systems," in Automation Science and Engineering, 2005. IEEE International Conference on, 2005, pp. 307-312.

[24] B. Lennartson, et al., "Modeling, specification and controller synthesis for discrete event systems," in Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on, 1998, pp. 698-703 vol.1.

[25] T. Gu and P. A. Bahri, "A survey of Petri net applications in batch processes," Computers in Industry, vol. 47, pp. 99-111, 2002.

[26] M. Tittus, et al., Deadlock avoidance in batch processes.

[27] J. W. C. Lai, "Petri-Net Based Integer Programs for Synthesizing Optimal Material-Transfer Procedures in Pipeline Networks," Journal-Chinese Institute Of Engineers, vol. 29; 2, pages 337-346, 2006.

[28] Y.-F. Wang, et al., "Generation of batch operating procedures for multiple material-transfer tasks with Petri nets," Computers & Chemical Engineering, vol. 29, pp. 1822-1836, 2005.

[29] M. Haji and D. Houshang, "Petri Net based Supervisory Control Reconfiguration of Project Management Systems," in Automation Science and Engineering, 2007. CASE 2007. IEEE International Conference on, 2007, pp. 460-465.

[30] N. A. Ruiz Jaramillo, "Diseño de un sistema de control lógico programable para la supervisión convencional de una central térmica ciclo combinado," Ingeniera de Control, Escuela de Mecatronica, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.

[31] G. Zapata Madrigal, et al., "Intelligent Production Systems Reconfiguration by Means of Petri Nets and the Supervisory Control Theory," in Advances in Petri Net Theory and Application, T. Aized, Ed.:intech, 2010