

Integración de redes de Petri en el diseño orientado a objeto de sistemas de fabricación*

P.R. Muro-Medrano, L.J. Sainz, J.A. Fernández, T. Jiménez y J. L. Villarrocí

Dpto. de Ingeniería Eléctrica e Informática
Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza
María de Luna 3, E-50015 ZARAGOZA, SPAIN

Abstract: MIKRON, a tool for the modeling

in this work. MIKRON is based on a representation schema which integrates knowledge representation techniques based on frames, high level Petri nets to describe the dynamics and it follows the object oriented design paradigm. A model is built by means of a set of representation primitives: resources, materials, products, operations and process plans. MIKRON also provides a specific modeling methodology.

Resumen: En este trabajo se presenta MIKRON, una herramienta que permite la creación de modelos de control de sistemas de manufactura. Dicha herramienta está basada en un esquema de representación resultado de la integración de: técnicas de representación estructurada del conocimiento basadas en frames, diseño orientado a objeto como base de la metodología de modelado y redes de Petri de alto nivel para la descripción de la dinámica. Un modelo se construye en torno a varios tipos de primitivas de representación: recursos, materiales, productos, operaciones y planes de proceso. MIKRON aporta también una metodología específica de modelado.

Palabras clave: modelado del control de SFF, Diseño orientado a objeto, Redes de Petri, Frames.

*Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos IT 10/91 del CONAI de la Diputación General de Aragón y ROB91-0949 de la CICYT del Estado Español.

1 Introducción

Un sistema flexible de manufactura (SFF) consiste en un conjunto de máquinas y almacenes, un sistema automático de transporte y un sistema de control por computador que permite idealmente su evolución sin intervención humana. Dicho sistema de control necesita un modelo donde se halle todo el conocimiento sobre operaciones, planes de proceso, máquinas, sectores de trabajo, herramientas, materiales, órdenes, etc. y sus interrelaciones. Dicho modelo involucra gran cantidad de conceptos no triviales y una compleja estructura de relaciones.

La creación de dichos modelos ha sido abordada desde múltiples aproximaciones, entre las que cabe destacar las basadas en técnicas de inteligencia artificial como [FOX 83] y [SMIT 86], o las basadas en modelos formales tales como las redes de Petri [GENT 88], [MART 87]. En este trabajo se propone un esquema de representación donde se integran diversas de estas aproximaciones con objeto de reunir las ventajas de cada una de ellas. Concretamente, se reúnen en un único esquema de representación: frames, redes de Petri de alto nivel [JENS 91] (RAN) y diseño orientado a objeto.

Existen algunos esquemas de representación similares al que se presenta. Las Object Petri Nets [SIBE 85] constituyen el esquema más presente en la literatura técnica relacionada. El modelo de un sistema está compuesto por un conjunto de objetos relacionados

(que definen el marcado de una RAN) y una RAN que especifica la evolución global del sistema. En esta aproximación, la RAN no está completamente integrada en el entorno orientado a objeto. En [BALD 88] el comportamiento interno de los objetos y su interacción están definidos mediante redes de Petri. Sin embargo, esta aproximación carece de la potencia de los esquemas basados en frames para representar relaciones (distintas de las dinámicas) entre los objetos. Finalmente, en [MICO 90] se presenta un esquema de representación basado en RAN y frames, pero las ventajas que propórciona el diseño

2 Modelado de sistemas de eventos discretos. KRON

KRON (Knowledge Representation Oriented Net) [MURO 89b] [MURO 90] [VILL 90], es un lenguaje de representación del conocimiento de sistemas de eventos discretos concurrentes. KRON está basado en la integración de:

- *Técnicas de representación basadas en frames.* Se han elegido los frames como base para la representación del conocimiento debido a su potencia para la representación de conceptos y sus relaciones.
- *Programación orientada a objeto.* Esta aproximación ofrece las siguientes ventajas: (1) Soporta modelos conceptuales cercanos a la conceptualización humana e independientes de la implementación. Así, los modelos son fácilmente comprensibles. (2) Permite el uso de representaciones gráficas y la especificación de especificaciones ejecutables. (3) Facilita la reusabilidad y extensibilidad de los modelos basadas en la encapsulación y la herencia.
- *Redes de Petri de Alto Nivel (RAN).* Las RAN son herramientas formales ampliamente extendidas en el modelado de la dinámica de sistemas de eventos

discretos de alta complejidad. Las RAN proporcionan el análisis formal de los modelos, su representación gráfica, su simulación y su ejecución eficiente.

De acuerdo con la metodología de la programación orientada a objeto, en un modelo KRON, cada entidad está representada mediante un objeto que recoge toda la información concerniente a la entidad que modela y a sus relaciones con otros objetos, estructurada en atributos. Si la entidad posee características dinámicas, su comportamiento se representa mediante una RAN integrada con

Desde el punto de vista de la dinámica se pueden distinguir las siguientes clases de objetos:

- *Objetos de Marcado.* Representan entidades sin comportamiento dinámico, al nivel de abstracción considerado. Tienen la misma semántica que las marcas de las RAN.
- *Objetos de Estado.* Son los objetos que representan entidades dinámicas. Para la representación del estado, dispone de los llamados *atributos de estado* (misma semántica que los lugares en una RAN). El estado de una entidad dinámica está definido por la distribución de objetos de marcado en los atributos de estado del objeto de estado que representa a la entidad.
- *Objetos de Acción.* Las acciones o actividades que modifican el estado de una entidad dinámica (transiciones en una RAN), son representadas en KRON mediante objetos de acción. Estos incluyen las *relaciones de red* (arcos de una RAN) que especifican las precondiciones y postcondiciones de la actividad modelada, y su descripción.

En [BAÑA 91] se presenta una implementación de KRON sobre el entorno LOOPS. En esta implementación se amplía la jerarquía

de LOOPS con un conjunto de objetos específicos que permiten el modelado de entidades dinámicas (RAN) y el establecimiento de relaciones entre distintos objetos; por otro lado, incrementa el conjunto de funciones aportadas por LOOPS con primitivas que permiten ampliar la jerarquía existente, así como ampliar o actualizar la información existente en los objetos y establecer relaciones entre distintos elementos de la jerarquía.

3 Modelado de sistemas de manufactura. MIKRON

MIKRON (Manufacturing Intended KRON) [MURO 89a] [MURO 90] [VILL 90] es el resultado de la ampliación de KRON con un conjunto de objetos y primitivas específicas del dominio de los SFF.

El modelo de coordinación de un SFF se construye en torno a varios tipos de primitivas de representación: recursos, materiales, productos, operaciones y planes de proceso. MIKRON aporta también una metodología específica de modelado. En ella se contempla los sistemas de fabricación desde dos puntos de vista diferentes:

1. *Funcional u orientado a las actividades.* Se realiza la descripción de las actividades y operaciones y su encadenamiento para realizar la producción.
2. *Estructural u orientada a los recursos.* Se describen los modelos de funcionamiento de los recursos de producción y las interconexiones entre ellos.

Las primitivas de representación de MIKRON se implementan mediante objetos predefinidos que se organizan en jerarquías de especialización, ampliables por el diseñador, y que parten de las jerarquías existentes en KRON. Son un total de cinco jerarquías, como se muestra en la figura 1:

- Los recursos de fabricación se hallan representados en la jerarquía cuya raíz es **Manufacturing-Resource**.

- La jerarquía descendiente de **Manufacturing-Marking-Object** contiene los prototipos de los materiales y productos que pueden circular por un SFF y las operaciones que se pueden realizar.
- Los descendientes de **Manufacturing-Action-Object** son los prototipos de los objetos de acción necesarios para modelar las RAN existentes tanto en los recursos de producción como en las operaciones.
- En la jerarquía **Auxiliar-Process** se incluyen los modelos de algunos procesos no principales, que pueden resultar interesantes en un determinado modelo de un recurso (como modelos de roturas, etapas de puesta en marcha, etc.).
- Los objetos de la jerarquía descendiente de **Manufacturing-Aggregation** permiten el diseño con diferentes niveles de agregación (sectores, celdas, máquinas, etc.).

En la figura 2 puede observarse, como ilustración, parte de la jerarquía descendiente de **Manufacturing-Resource**. Dicha jerarquía contiene los objetos de estado que modelan diferentes recursos que pueden aparecer en un SFF. Los objetos de la jerarquía de recursos de manufactura heredan las redes subyacentes de objetos que modelan procesos básicos: secuencia, sincronización, decisión, etc. Estas redes, así como otro tipo de informaciones, son especializadas al descender por la jerarquía. A modo de ejemplo, en la figura 3 puede observarse el conjunto de objetos que forman el modelo de una máquina genérica de transformación y en la figura 4 la RAN subyacente.

Todos estos objetos poseen métodos que permiten actualizar el contenido de sus atributos, conocer propiedades de los mismos, indicar como se pueden sincronizar entre sí, etc. Además de su comportamiento dinámico, en los objetos de estado se recogerán aquellas características físicas y técnicas relevantes, así como la recopilación de información histórica

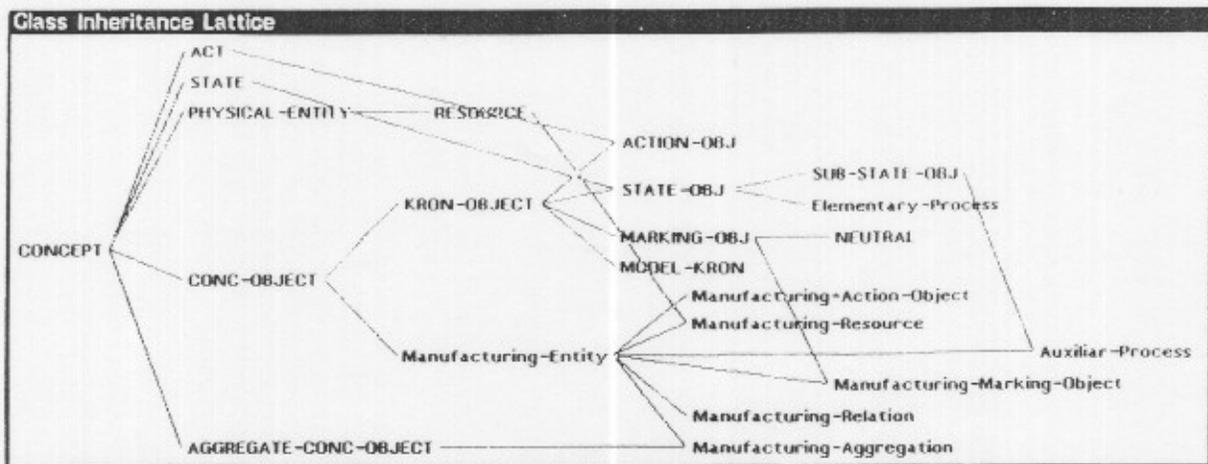


Figura 1: Início da hierarquia de MIKRON

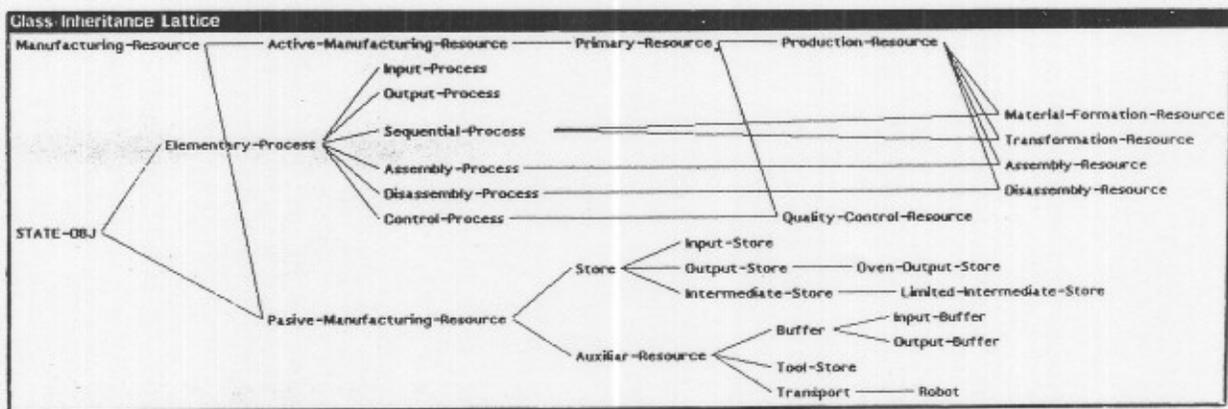


Figura 2: Hierarquia de Recursos de Manufatura.

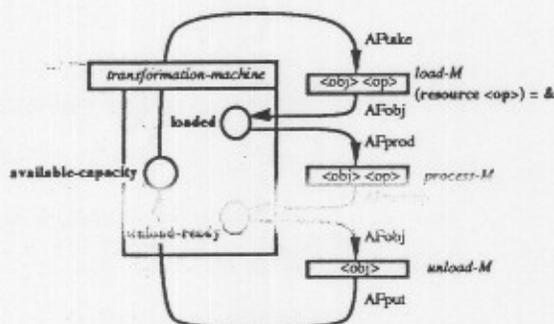


Figura 4: RAN subyacente de uma máquina de transformação.

y predictiva, necesaria en aplicaciones de simulación y planificación.

Para la creación del modelo deseado de la planta se sigue el siguiente proceso: 1) se instancian los prototipos de los recursos que componen el sistema a modelar y se rellenan los contenidos de los atributos necesarios y 2) se relacionan las instancias creadas mediante la sincronización de objetos de acción que modelan la misma actividad.

Cuando un material entra en el proceso productivo, se le considera un *producto* con un *plan de proceso* asociado. Tanto materiales como productos se modelan mediante objetos de marcado que recorren la red que modela la planta de producción. Entre otros, los principales datos que contiene un producto son: plan de proceso asociado, estado de

```

{Transformation-Machine
  is-a : Transformation-Resource Machine
  states : loaded unload-ready available-capacity
    ; state slots
  loaded :
  unload-ready :
  available-capacity :
  actions : load process unload ; action slots
    load : load-M
    process : process-M
    unload : unload-M
  ; predicted information and data collection
  pending-operations :
  statistics :
  max-part-size : ; physical characteristics
  constraints :
  set-up :
  average-processing-time :
  precision-level : ; abstraction hierarchy relations
  has-resource :
  resource-of :
  type-of-synchro : ; interface features
  input-synchro :
  output-synchro :
  icon : ; graphic representation characteristics
  wickname :
  comment : }

{load-M
  is-a : Action-Obj
  pre-net-relations : (& available-capacity AFtake)
  post-net-relations : (& loaded AFobj)
  associated-data : <obj> <op>
  predicate : (resource <op>) = &
  ao-conflict-of : }

{unload-M
  is-a : Action-Obj
  pre-net-relations : (& unload-ready AFobj)
  post-net-relations : (& available-capacity AFput)
  associated-data : <obj>
  predicate : t
  ao-conflict-of : }

{process-M
  is-a : Action-Obj
  pre-net-relations : (& loaded AFprod)
  post-net-relations : (& unload-ready AFobj)
  associated-data : <obj> <op>
  predicate : t
  ao-conflict-of : }

AFobj : {s-name <obj>}
AFtake : {s-name one}
AFput : {s-name one}
AFprod : {s-name <obj>; operation <op>}
AFnextop : {s-name <obj>; operation (next <op>)}

```

Figura 3: Frames del conjunto de objetos que representan a una máquina genérica de transformación.

fabricación en el que se encuentra, operación que se está realizando en este momento sobre él, datos sobre la demanda, en caso de ser un ensamblado, los componentes, materiales, etc.

Las *operaciones* son las actividades que se realizan sobre los productos en el proceso productivo. Estas pueden suponer una transformación del producto, como en el caso de las operaciones de manufactura, o no, como en las operaciones de transporte o almacenaje. En MIKRON una operación tiene una doble perspectiva: como objeto de estado y como objeto de marcado. Como objetos de estado representan la dinámica que la operación tiene como parte de un plan de proceso. Las RAN que las modelan provienen de los procesos elementales como en el caso de los recursos. Los planes de proceso se forman mediante la sincronización de las mismas. Como objetos de marcado recorren la RAN que representa el plan de proceso, indicando con su información (producto sobre el que se está realizando, recurso en el que se está llevando a cabo,

etc.) el estado actual de fabricación de cada producto.

La construcción de un modelo de plan de proceso se realiza de forma similar a como se construye el modelo de la planta: 1) se realizan instancias de los prototipos de operaciones que vayan a formar un plan y 2) se sincronizan estas operaciones, formando la secuencia de operaciones deseada.

El modelo de coordinación de un SFF debe reunir las restricciones de la perspectiva estructural, correspondiente al modelado de los recursos y su sincronización, y de la funcional, correspondiente a los planes de proceso, en un único modelo. Para ello se sincronizará el modelo del sistema de fabricación con el plan de proceso. De esta forma ambas perspectivas evolucionarán acompasadamente.

MIKRON proporciona la posibilidad de crear modelos a distintos niveles de abstracción. Existen objetos para representar entidades a distintos niveles de abstracción (máquina, celda,

sector y planta) y mecanismos para relacionar un objeto con sus objetos componentes al nivel de abstracción inferior. Así por ejemplo, el valor de la capacidad de una celda puede ser inferido a partir de las capacidades de las máquinas que la componen.

Se han desarrollado un conjunto de primitivas específicas para la creación de modelos y que completan las primitivas que KRON posee, simplificando ciertos aspectos del modelado, lo cual no impide que se pueda crear estos modelos acudiendo directamente a las rutinas que KRON proporciona. Las primitivas creadas se pueden agrupar según su objetivo

- Creación de modelos de objetos aislados, es decir, funciones para ampliar las ramas que modelan los recursos, la operaciones y los productos y para construir las instancias de las clases que se encuentran en las mismas.
- Sincronización de las instancias que modelan objetos aislados para construir el modelo de la planta de producción y los modelos de cada uno de los planes de operaciones.
- Sincronización del modelo de la planta de producción con los modelos de los planes de operaciones.
- Modelado desde diferentes niveles de abstracción.
- Primitivas para establecer el modelo de una determinada situación de la planta (relacionar los los productos con los recursos y operaciones) y para la obtención de información.

4 Conclusiones

La implementación de MIKRON se ha centrado en la ampliación de la jerarquía que KRON posee, con la inclusión de objetos específicos pertenecientes al dominio de sistemas de manufactura. Además se han creado un

conjunto de funciones que facilitan la construcción del modelo, buscando que el usuario de esta herramienta no tenga que conocer el mecanismo de funcionamiento de KRON. Un punto importante de la implementación realizada es la posibilidad de construcción de agregaciones, con la facilidad de modelado que aportan, fundamentalmente en caso de que el SFF posea estructuras constructivas repetitivas (p.e. varias celdas de trabajo similares).

El modelo creado mediante esta herramienta puede ser empleado con diversos fines, desde la simple simulación de un SFF, uniendo el modelo a un simulador, hasta el control directo

informático de control y toma de decisiones.

Esta versión de MIKRON ha sido implementada en una estación de trabajo 1186 de XEROX corriendo sobre el entorno LOOPS. Sobre la misma estación de trabajo se está desarrollando un entorno gráfico que facilitará la creación de los modelos. Actualmente se está desarrollando una versión mejorada de MIKRON sobre una estación de trabajo Sun utilizando el entorno de desarrollo KEE.

Bibliografía

- [BALD 88] G. Baldassary, G. Bruno: "An Environment for Object-Oriented Conceptual Programming Based on PROT Nets". In *Advances in Petri Nets 1988, LNCS 340*. Ed. Springer-Verlag. 1988. pp. 1-19
- [BAÑA 91] J.A. Bañares, P.R. Muro y J.L. Villarreal: "Implementación de un esquema de representación del conocimiento para sistemas de eventos discretos". *IV Reunión Técnica de Inteligencia Artificial AEPIA-91*, Madrid, Octubre 1991.
- [FOX 83] Fox M.S.: "Constraint Directed Search: A Case Study of Job-Shop Scheduling." *PhD dissertation, Computer Science Dep., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (USA)*. 1983.
- [GENT 88] J.C. Gentina, J.P. Bourey and M. Kapusta: "Coloured Adaptive Structured

- Petri-Net: A Tool for the Automatic Synthesis of Hierarchical Control of Flexible Manufacturing Systems". *Computer-Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 1, February 1988. pp. 39-47.
- [JENS 91] Jensen K. and Rozenberg G. (Eds.): "High-level Petri Nets. Theory and Application". Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [MART 87] Martínez J., Muro P.R. and Silva M.: "Modeling, Validation and Software Implementation of Production Systems using High Level Petri Nets". En *IEEE International Conference on Robotics and Automation pp. 1180-1185*. Raleigh, North Carolina, 1987.
- [MICO 90] A. Micovsky, L. Sesera, M. Veishab, M. Albert: "TORA: A Petri Net Based Tool for Rapid Prototyping of FMS Control Systems and its Application to Assembly". *Computers in Industry*, Vol. 15, No 4. 1990. pp. 279-292
- [MURO 89a] Muro P.R., Villarroel J.L., Martinez J. and Silva M.: "A Knowledge Representation Tool for Manufacturing Control Systems Design and Prototyping.". *Proc. of INCOM'89, 6th IFAC/IFIC/IFORS/IMACS Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology*. Madrid(Spain). September. 1989.
- [MURO 89b] P.R. Muro, J.L. Villarroel: "KRON: Redes Orientadas a la Representación del Conocimiento". *Actas de la III Reunión Técnica de Inteligencia Artificial, AEPIA '89*. Madrid. Noviembre 1989.
- [MURO 90] Muro P.R.: "Aplicación de Técnicas de Inteligencia Artificial al Diseño de Sistemas Informáticos para el Control de Sistemas de Producción". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería eléctrica e Informática, Universidad de Zaragoza. Abril, 1990.
- [SIBE 85] C. Sibertin-Blanc: "High-Level Petri Nets with Data Structures". *Proc. of Workshop on Applications and Theory of Petri Nets*, Finland, June 1985.
- [SMIT 86] Smith S.F., Fox M.S. and Ow P.S.: "Constructing and Maintaining Detailed Production Plans: Investigations into the Development of Knowledge-Based Factory Scheduling Systems". *AI Magazine*, pp. 45-60, Fall. 1986.
- [VILL 90] Villarroel J.L.: "Integración Informática del Control de Sistemas de Fabricación Flexible". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería eléctrica e Informática, Universidad de Zaragoza. Septiembre, 1990.



**ROBÓTICA
E AUTOMATIZAÇÃO**

REVISTA DE INFORMAÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL
Nº 10 • Novembro 1992

ALEXANDRE TATO
Director

TENREIRO MACHADO
Director Científico

LUÍS SÁ
Director Adjunto

ANTÓNIO MALHEIRO
Editor

PAULO ANDREZ
Delegado em Lisboa

PAULO ALVES
Design

ALBANO PEREIRA
Marketing
Tel. (02) 510 05 18

SÉRGIO CASTRO
Assinaturas
Tel. (02) 57 77 28

CONSELHO EDITORIAL:
CAMARINHA MATOS
Robótica e CIM
EUGÉNIO OLIVEIRA
Inteligência Artificial
PINA CABRAL
Automação
PEREIRA DIAS
Electrónica Industrial
AMORIM MARQUES
Informática

ORGANIZAÇÃO E EDIÇÃO DESTE NÚMERO:
CAMARINHA MATOS

COLABORAÇÃO ESPECIAL:
STEIGER GARCÃO

PROPRIEDADE E ADMINISTRAÇÃO:
PUBLINDÚSTRIA

Produção de Comunicação, Lda.
Rua Ferreira dos Santos, 124
4300 PORTO

Tel. (02) 56 54 82 - Fax (02) 510 05 17

BRITISH REPRESENTATION:
ROBERT G. HORSFIELD
EDWARD J. KANIA
International Publishers Representatives
Daisy Bank - Chislehurst
Via Stockport SK12 6DA - ENGLAND
Tel. (0663) 75 02 42 - Fax (0663) 75 09 73

COMPOSIÇÃO FOTOLITO E MONTAGEM:
PUBLINDÚSTRIA

IMPRESSÃO E ACABAMENTO:
PUBLICOR
Serzedo, V. N. GAIA
Tel. (02) 762 64 86

TIRAGEM:
3.000 EXEMPLARES

DEPÓSITO LEGAL:
113164



Os trabalhos assinados
são da exclusiva responsabilidade
dos seus autores

SUMÁRIO

3 EDITORIAL

5 APRESENTAÇÃO

6 CURRÍCULAVITAE

ANÁLISE DE SISTEMAS
DE MANUFATURA COM BASE

11 INTEGRACIÓN DE REDES DE PETRI
EN EL DISEÑO ORIENTADO
A OBJECTO DE SISTEMAS
DE FABRICACIÓN

19 ANÁLISE DE SISTEMAS INTEGRADOS
DE MANUFATURA BASEADA
NA METODOLOGIA MFG/PFS

25 ANÁLISE SEMI-AUTOMÁTICA
DE MARK FLOW GRAPHS

31 ESPECIFICAÇÃO E REALIZAÇÃO
DE CONTROLADORES UTILIZANDO
REDES DE PETRI COLORIDAS
E SINCRONIZADAS INTEGRANDO
LÓGICA IMPRECISA

ESCALONAMENTO E CONTROLE

39 UMA METODOLOGIA
PARA IMPLEMENTAÇÃO
DE SISTEMAS DE CONTROLE
E PROJEÇÃO TEMPORAL
DE ATIVIDADES

45 UMA APROXIMAÇÃO
AO ESCALONAMENTO DINÂMICO

55 SCHEDULING EN CELDAS
AUTÓNOMAS DE ENSAMBLAJE
BASADO EN UN ALGORITMO
DE TIEMPO MÍNIMO EN RdP

PLANEAMENTO E MONITORAÇÃO
EM ROBÓTICA

61 PROGRAMACIÓN IMPLÍCITA
DE ROBOTS:
UNA APROXIMACIÓN FORMAL

69 PLANEAMENTO EFICIENTE
EM TAREFAS DE MONTAGEM

75 EXECUÇÃO, MONITORAÇÃO
SENSORIAL E REACÇÃO
A SITUAÇÕES DE EXCEÇÃO
EM ROBÓTICA DE MONTAGEM

CONCEPÇÃO DE SISTEMAS
DE MANUFATURA

81 ENTORNO DE DESARROLLO
DEL CONTROL DE SISTEMAS
DE MANUFATURA

87 DISEÑO DE CELULAS FLEXIBLES
DE MANUFATURA

91 SADS INTELIGENTES
PARA PLANEJAMENTO
EM MANUFATURA:
UMA ABORDAGEM VIA MODELAGEM
VISUAL INTERATIVA

PROGNÓSTICO, VEÍCULOS
AUTÓNOMOS E SEQUENCIAMENTO
DE TRÁFEGO

95 CARACTERIZAÇÃO AUTOMÁTICA
DE PADRÕES EM SENSORES
DE MÁQUINAS CNC

107 SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS
AUTÓNOMOS SUBAQUÁTICOS
CONTROLADOS
POR COMPORTAMENTOS

113 UMA APROXIMAÇÃO "MUNDOS
POSSÍVEIS" AOS PROBLEMAS
DE ESCALONAMENTO DE VOOS

Agradecemos à UNISYS a excelente colaboração
que prestou na informatização dos nossos serviços