

1.65

# Relatório de Estágio

## **PROGRAMA PRODEP MEDIDA 4.3**

### **RELATÓRIO DE ACTIVIDADES DA ACÇÃO 1.65**

Estágio para Licenciatura em Física

Técnicas de Simulação, Controlo e Optimização para Sistemas Autónomos

Aplicações na Robotica e nos Processos de Manufatura

PRODEP Fase N.º 4.3.1.3.1.1



## **SISTEMAS DE MANUFACTURA E ESTATÍSTICAS: UM ESTUDO E UMA APLICAÇÃO**

Junho de 1993

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
CENTRO DE INVESTIGACÃO EM FÍSICA  
ESTATÍSTICA E MANUFATURA

Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
Biblioteca

Nº

62.3043.3/LEC 1192/FUR

Data 25/05/2009

# Relatório de Estágio

**Estágio para licenciatura no tema**

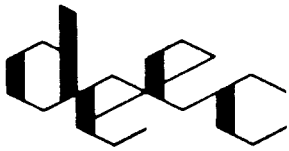
Técnicas de Simulação, Controlo e Optimização para Sistemas Autónomos-  
Aplicações na Robótica e em Processos de Manufactura

**PRODEP Proc. N° 4.3/7.04/92**

**Autor**

Rui Manuel Martins Furtado

**Junho de 1993**



FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex, PORTUGAL  
Telef. 351-2-317105/107/412/457 · Telex 27323 FEUP P · Telefax 351-2-319280

**Ação de Formação Prodep 4.3/7.04/92**

Formando: Rui Manuel Martins Furtado

Orientador Científico: Fernando Manuel Ferreira Lobo Pereira

Este relatório corresponde à apreciação científica das actividades desenvolvidas pelo Lic<sup>o</sup> Rui Manuel Martins Furtado durante o segundo semestre de 1992.

O trabalho desenvolvido foi de elevado mérito e executado com grande dedicação.

Os trabalhos realizados e o relatório apresentados pelo formando reflectem, com rigor a natureza dos trabalhos executados.

Além do empenhamento e das excelentes qualidades do estagiário concorreram para o sucesso deste trabalho, os meios disponibilizados.

O Supervisor do Estágio na FEUP

Fernando M. F. Lobo Pereira  
Prof. Aux. da FEUP

# ISR - Instituto de Sistemas e Robótica

DEEC - R. dos Bragas, 4099 Porto Codex, Portugal

Fax: 351 - 2- 319280

Tel: 351 -2 - 2007505

---

REFERÊNCIA DO PROJECTO 4.3/1.65/92

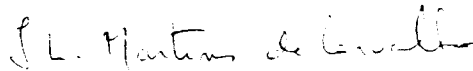
## Parecer Técnico

Acompanhei os trabalhos de estágio realizados no Pólo do Porto do Instituto de Sistemas e Robótica pelo Lic<sup>o</sup> Rui Manuel Martins Furtado, bem como apreciei os trabalhos produzidos e apresentados em Congressos Internacionais e o relatório oportunamente apresentado.

Com base no acompanhamento referido, considero que aqueles trabalhos reflectem o trabalho efectivamente realizado, revelando elevado empenhamento do estagiário.

Sou portanto de parecer que foram plenamente atingidos os objectivos inicialmente propostos no plano de trabalhos,

O Supervisor do Estágio no Instituto de Sistemas e Robótica



Prof. Doutor Jorge L. Martins de Carvalho

**Programa PRODEP  
Medida 4.3**

**Estágios Profissionais para Bacharelatos,  
Licenciaturas e Pós-Graduações, na área de  
Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores, subordinada ao tema  
"Técnicas de Simulação, Controlo e  
Optimização para Sistemas Autónomos -  
Aplicações na Robótica e em Processos de  
Manufactura"**

Relatório de Actividades de:  
**Rui Manuel Martins Furtado**

# Índice

1. Actividade Desenvolvida .....	2
1.1 Âmbito da Actividade.....	2
1.2 Estudos Efectuados.....	2
1.3 Aplicação Prática .....	5
1.4 Publicações e Comunicações em Conferências .....	5
2. Apêndices .....	6
2.1 Bibliografia e Referências .....	6
2.2 Publicações .....	11

# 1. Actividade Desenvolvida

## 1.1 Âmbito da Actividade

A actividade desenvolvida enquadrou-se no âmbito de um projecto de investigação de um grupo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na área do planeamento e controlo hierárquico de processos de manufactura, nomeadamente na criação de um sistema de simulação de escalonamento e sequenciamento de processos de manufactura.

## 1.2 Estudos Efectuados

O estudo foi realizado em três fases, seguindo uma evolução natural. Na primeira fase pretendeu-se obter algum 'background' nas áreas relacionadas com os processos de manufactura, seu controlo e simulação. As segunda e terceira fases centraram-se na questão das medidas estatísticas nos processos de manufactura em geral e em pacotes de software da área da simulação e controlo de sistemas produtivos.

Em apêndice pode-se encontrar a bibliografia consultada.

### **Aquisição de 'background' em áreas relacionadas com processos de manufactura, seu controlo e simulação:**

Dividiu-se a atenção por cinco temas de relevo relacionados com a organização, controlo e simulação de sistemas de manufactura - arquitecturas de controlo, sequenciamento, FMS, JIT, e simulação e sistemas de manufactura.

O desenvolvimento dos sistemas de manufactura flexíveis (FMS) e sistemas de manufactura automatizados (AMS), veio colocar ênfase na necessidade da existência de um eficaz sistema de controlo que permita uma eficiente utilização dos recursos disponíveis. Um tal sistema de controlo inclui várias responsabilidades de tomada de decisão, incluindo escalonamento, encaminhamento de partes, e alocação de recursos. É função da arquitectura de controlo alocar essas responsabilidades de decisão a elementos de controlo específicos, ou seja, a **arquitectura de controlo** faz de componentes de controlo um sistema de controlo.

A extraordinária evolução verificada na tecnologia, bem assim como o aumento dos requisitos de ambientes de manufactura, têm sido acompanhados por um evoluir das arquitecturas de controlo. De facto, a evolução das arquitecturas de controlo tem acompanhado as tendências gerais em termos de arquitecturas organizacionais, passando de estruturas extremamente centralizadas, a hierárquicas, hierárquicas modificadas e heterárquicas, aproximando assim o poder de decisão do local de execução, aumentando a flexibilidade e fiabilidade dos sistemas de controlo.

Pode-se definir **escalonamento da produção** como a alocação de recursos finitos de produção, no tempo, a diversas tarefas, de modo a satisfazer da melhor



forma um determinado conjunto de objectivos, e de maneira que em qualquer instante nenhuma máquina processe mais do que uma tarefa, e nenhuma tarefa seja processada por mais do que uma máquina.

Os problemas de escalonamento da produção podem ser classificados em diversos tipos - problemas de máquina única; problemas de máquinas em paralelo (máquinas idênticas, uniformes ou não relacionadas; permitindo interrupção ou não); problemas de multi-operações (open-shop; flow-shop; job-shop).

Devido à simplicidade e raridade dos dois primeiros tipos de problemas, eles não foram abordados, centrando-se o estudo nos problemas de multi-operação, nomeadamente nos problemas de job-shop e flow-shop.

A ideia da flexibilidade aparece sempre associada a uma capacidade de enfrentar situações imprevistas, ou pelo menos variantes. De facto o que se pretende ao introduzir flexibilidade numa organização é torná-la mais robusta e melhor preparada para enfrentar o ambiente em que se inclui.

No mercado global em que actualmente vivemos sente-se cada vez mais a impossibilidade de organizações pesadas e rígidas sobreviverem. É necessário preparar as organizações a responderem às solicitações do mercado de uma forma extremamente eficaz e eficiente. Para tal estas devem dispôr de sistemas produtivos com pequenas constantes de tempo, isto é, que permitam à organização responder rapidamente às variações na procura, seja na quantidade, seja no produto propriamente dito.

Um sistema de manufactura flexível (*FMS*), se bem implementado e aproveitado, pode conduzir a organização a um nível de flexibilidade que lhe permita ser extremamente competitiva no mercado actual.

Para o bom funcionamento de um sistema produtivo flexível é essencial dispôr de um eficaz mecanismo de controlo do mesmo. Um tal mecanismo deveria idealmente realizar todas as tarefas de controlo da produção, desde o sequenciamento à monitorização e resolução de situações não previstas. Embora nos últimos anos se tenha realizado bastante trabalho nesta área, a dimensão da tarefa em causa impede que se tenha sequer aproximado de um tal mecanismo.

Prevê-se no futuro uma crescente proliferação de *FMSs*, sendo portanto de capital importância o desenvolvimento de novas soluções neste campo.

A filosofia de produção *Just-In-Time* (JIT) baseia-se em conceitos extremamente simples - produzir apenas o necessário, quando necessário; eliminação de desperdícios de matéria prima, capital, mão de obra, tempo de inactividade, enfim, tudo aquilo que não acrescente valor ao produto final; melhoria da produtividade, qualidade, serviços ao cliente, etc.

A aplicação das ideias base da filosofia JIT conduziria a sistemas produtivos eventualmente perfeitos, onde não existiria qualquer desperdício. Tal não é porém fácil, ou porventura possível, de atingir, limitando-nos assim a procurar a chegar o mais próximo possível da perfeição - produção sem defeitos; fluxo contínuo de manufactura; tempos de setup e tamanho de lotes de produção mínimos; stock nulo; operações standard, comuns a uma grande variedade de produtos; manutenção preventiva; sistema de controlo da produção do tipo Pull; número mínimo de fornecedores que usem também JIT; níveis de produção uniformizados; trabalhadores multi funcionais.

Outros conceitos intimamente ligados ao JIT são os conceitos de Total Quality Control (TQC), Statistical Quality/Process Control (SP/QC), Factory Automation (FA),

Total Productive Maintenance (TPM), Envolvimento dos Fornecedoros e Consideração do Factor Humano.

A **simulação** é uma poderosa ferramenta a utilizar em qualquer situação que envolva incerteza e tomadas de decisão, permitindo, se correctamente utilizada, aumentar o conhecimento sobre a situação em causa. Nos **sistemas de manufactura** a simulação é utilizada em duas situações - no apoio ao design do sistema; e, no escalonamento da produção.

#### **Levantamento de medidas estatísticas relevantes em sistemas de manufactura:**

Após o estudo de questões gerais de sistemas de manufactura a atenção focou-se no aspecto particular, de enorme importância, das medidas estatísticas utilizadas para monitorização e avaliação de desempenho de sistemas de manufactura.

Foi elaborada uma classificação baseada das medidas encontradas na bibliografia e em contactos com sistemas de manufactura e outra documentação.

#### **A estatística em software de simulação e controlo de sistemas de manufactura:**

Na continuação do estudo sobre estatísticas e sistemas de manufactura, foi realizada uma análise das medidas estatísticas incluídas em software de simulação e controlo de sistemas de manufactura.

Esta fase incluiu a utilização do software "SIMFACTORY" e análise do seu desempenho e capacidades, bem assim como uma deslocação a Inglaterra por forma a frequentar um curso de iniciação na linguagem de programação "MODSIM II".

### **1.3 Aplicação Prática**

Na posse de conhecimentos sobre sistemas de manufactura e a sua envolvente, as estatísticas de importância para a sua avaliação, e, o que se pode encontrar em software de simulação e controlo da produção, estavam reunidas as condições para proceder à introdução das medidas estatísticas adequadas no sistema de simulação para planeamento e controlo hierárquico de processos de manufactura em desenvolvimento referido em 1.1.

Assim, como corolário da actividade, foram seleccionadas as estatísticas consideradas indicadas para o pretendido, e implementadas utilizando a linguagem de programação 'MODSIM II'.

### **1.4 Publicações e Comunicações em Conferências**

Foram realizadas três comunicações em conferências:

- "SIMCOH - Um Ambiente de Simulação para o Planeamento e Controlo Hierárquico de Processos de Manufactura", ENDIEL 93, Exponor, Abril 1993.

- "Um Ambiente de Simulação para o Planeamento e Controlo Hierárquico de Sistemas de Manufactura", 3<sup>as</sup> Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica, Barcelona, Julho 1993.

- "A Simulation Environment for Hierarchic Planning and Control of Manufacturing Systems", IASTED '93, Oxford, Setembro 1993.

, das quais resultaram publicações nos respectivos proceedings, as quais podem ser encontradas em apêndice.

## 2. Apêndices

### 2.1 Bibliografia e Referências

- [B1] Melnyk, Steven, Carter, Phillip, "Production Activity Control : A practical guide", Dow Jones - Irwin, 1987
- [B2] Coad, Peter, Yourdon, Edward, "Object-Oriented Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1991
- [B3] Coad, Peter, Yourdon, Edward, "Object-Oriented Programming", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [B4] Booch, Grady, "Object Oriented Design With Applications", The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1991
- [B5] Pressman, R. S., "Software Engineering - A Practitioner's Approach", 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, 1992
- [B6] MODSIM II The Language for Object-Oriented Programming Reference Manual, CACI Products Company
- [B7] MODSIM II The Language for Object-Oriented Programming Tutorial, CACI Products Company
- [B8] MODSIM II The Language for Object-Oriented Programming User's Manual, CACI Products Company
- [B9] SIMGRAPHICS II User's Manual for MODSIM II, CACI Products Company

### Arquiteturas de Controlo

- [A1] Dilts, D. M., Boyd, N. P., Whorms, H. H., "The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems", Journal of Manufacturing Systems, Vol 10, N 1, pp.79-93
- [A2] Albus, James S. et al, "A Reference Model Architecture for ARTICS", Manufacturing Review, Vol 4, N 3, September 1991, pp. 182-193
- [A3] Albus, James S., "RCS: A Reference Model Architecture for Intelligent Machine Systems", DRAFT
- [A4] Mackulak, Gerald T., " High Level Planning and Control: An IDEF0 Analysis for Airframe Manufacture", Journal of Manufacturing Systems, Vol 1, N 2, pp.121-133
- [A5] David Wu, Szu-Yung, Wysk, Richard A., "Multi-pass Control System - A Control/Scheduling Structure for Flexible Manufacturing Cells", Journal of Manufacturing Systems, Vol 7, N 2, pp.107-120
- [A6] Simpson, J. A. , Hocken, R. J., Albus, J. S., "The Automated Manufacturing Research Facility of the National Bureau of Standards", Journal of Manufacturing Systems, Vol 1, N 1, pp.17-31

### Sequenciamento

- [Q1] Ackoff, Russell L., " Optimization + Objectivity = Opt Out ", European Journal of Operational Research , Vol. 1 , 1987
- [Q2] Barrett, Robert e Suknan Kadipasaoglu, " Dispatching Rules for a Dynamic Flow Shop " in Production and Inventory Management Journal - First Quarter , 1991, pp.54-58
- [Q3] Bispo, Carlos F.G., João Sentieiro, " An Extended Horizon Sheduling Algorithm for the job shop problem ", Instituto Superior Técnico
- [Q4] Dar-El, Ezey M., Richard A. Wysk, "Job Shop Scheduling - A systematic Approach", Journal of Manufacturing Systems, Vol 1, N 1, pp. 77-88
- [Q5] Duggan, James, Jim Browne, " Production Activity Control : A practical Approach to Scheduling ", The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 4 (1991), pp.79-103

[Q6] Ehteshami, Babak, Raja G. Pétrakian, Phyllis M. Shabe, "Trade-offs in Cycle Time Management : Hot Lots"

[Q7] Guarnani, Hareesh, Pravin K. JOhri, " A Study of Performance Objectives in the Scheduling of Manufacturing Systems ", Journal of Manufacturing Systems, Vol 10, N 5 , pp.422-429

[Q8] Hoitomt, Debra J., Peter B. Luh, Scott Bailey, Steve LoStocoo, "A Pratical System for Scheduling Manufacturing Job Shops ", IEEE 1992, pp.284-392

[Q9] McKay, Kenneth N., Frank R. Safayeni, John A. Buzacott, "Job-Shop Scheduling Theory : What is relevant ? ", Interfaces 18:4, July-August 1988, pp.84-90

[Q10] Nyen, P.A., " OPT - rules in descrete event simulation models. An algorithm for scheduling based on critical source identification ",Proc. 4th Int. Conf. Simulation in Manufacturing, Nov. 1988, pp.21-32

[Q11] Ribeiro, M. Isabel, et al, " A CIM approach to scheduling and material handling : a case study "

[Q12] Sarkis, Joseph, " Production and Inventory Control issues in Advanced Manufacturing Systems ", Production and Inventory Management Journal - First Quarter, 1991, pp. 76-82

[Q13] Sponseller, Eric A., " Overlapped Scheduling of Flow-Shop Production using a spreadsheet model ", Production and Inventory Management Journal- Second Quarter, 1992, pp.74-79

[Q14] Zhou, Chen, Pius J. Egbelu, " Scheduling in a Manufacturing Shop with Sequence-Dependent Setups ", Robotics & Computer - Integrated Manufacturing, Vol.5, N°1, pp.73-81, 1989

[Q15] SuperCalc4, versão 1.00, Computer Associates International Inc. (1986)

## **FMS**

[F1] Dupont-Gateland, Catherine, "A Survey of Flexible Manufacturing Systems", Journal of Manufacturing Systems, Vol 1, N 1, pp.1-15

[F2] J. A. Simpson, R. J. Hocken, e J. S. Albus, "The Automated Manufacturing Research Facility of the National Bureau of Standards", Journal of Manufacturing Systems, Vol 1, N 1

[F3] Ashton, James E., "Managing Design for Continuous Improvement in a System Job Shop", Manufacturing Review, Vol 5, N 3, September 1992, pp.149-157

[F4] Ranta, J., Tchijov, I., "Economics and Sucess Factors of Flexible Manufacturing Systems: The Conventional Explanation Revisited", The International Journal of Manufacturing Systems, 2 (1990), pp.169-190

[F5] "The Quality Revolution in Plastics Industry Manufacturing", Plastics Technology, November 1984

[F6] Krasa Sethi, Andrea, Pal Sethi, Suresh, "Flexibility in Manufacturing: A Survey", The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2 (1990), pp.289-328

[F7] Maimon, O. Z., "Real-time Operational Control of Flexible Manufacturing Systems", Journal of Manufacturing Systems, Vol 6, N 2, pp.125-136

[F8] Deane, Richard H., Moon, Seok H., " Work Flow Control in the Flexible Flow Line", The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 3/4 (1992), pp. 217-235

## **JIT**

[J1] Kimura,O. & Terada,H. , "Design and analisys of Pull Systems, a method of multi-stage production control", International Journal of Production Research, 1981, Vol 19, N 3, pp. 241-253

[J2] Tae-Moon, Kim, "Just-in-time manufacturig system : a periodic pull system", International Journal of Production Research., 1985, Vol 23, N 3, pp. 553-562

[J3] Richa,C. & Edwards,D. K., "A JIT Implementation Plan Using Policy Deployment", Manufacturig Review, Vol 5, N 3, September 1992, pp.166-174

- [J4] Kulwiec, R., "Toyota's new parts center targets top service", *Modern Materials Handling*, November 1992, pp. 73-84
- [J5] Stromstad, B., "Lessons Learned : A Jit Implementation Case Study", *Manufacturing Techniques*
- [J6] Uzsoy, R., Martin-Vega, L.A., "Modelling kanban-based demand-pull systems: a survey and critique", *Manufacturing Review*, Vol 3, N 3, September 1990, pp.155-160
- [J7] Di Mascolo, M., Frein, Y., Dallery, Y., "Queueing Network Modeling and Analysis of Kanban Systems", 0-8186-2615-1/92, IEEE 1992, pp.202-211
- [J8] Miltenburg; J., "Level Schedules For Mixed-Model Assembly Lines In Just-In-Time Production Systems", *Management Science*, Vol 35, N 2, February 1989, pp.192-207
- [J9] Huang, P.Y., Moore, L.J. & Shin, S., "World-Class Manufacturing In the 1990s : Integrating TQC, JIT, FA and TPM With Worker Participation", *Manufacturing Review*, Vol 4, N 2, June 1991, pp.87-95
- [J10] Sohal, A.S. & Naylor, D., "Implementation of JIT in a Small Manufacturing Firm", *Production and Inventory Management Journal*, First Quarter, 1992, pp. 20-25
- [J11] Miayzaki, S., Ohta, H., Nishiyama, N., "The Optimal Operation Planning of Kanban to Minimize the Total Operation Cost", *International Journal of Production Research*, Vol.26, N°10, pp 1605-1611, 1988
- [J12] Orth, D., Hybil, R., Korzan, D., "Analysis of a JIT Implementation at Dover Corporation", *Production and Inventory Management Journal - Third Quarter*, 1990, pp.79-82
- [J13] "Your Suppliers Are Just Getting Started, Too", *Plastics Technology*, November, 1984, pp.89-91
- [J14] "Succeeding With Statistical Process/Quality Control", *Plastics Technology*, November, 1984, pp.95-99
- [J15] von Hassell, A., Kirkland, C., "The Quality Revolution In Plastics Manufacturing", *Plastics Technology*, November, 1984, pp. 75-85

## Object-Oriented

- [O1] de Champeaux, D., et al, "The Process of Object-Oriented Design", *OOPSLA '92*, pp. 45-62
- [O2] de Champeaux, D., et al, "Case Study of Object-Oriented Software Development", *OOPSLA '92*, pp. 377-391
- [O3] Guimarães, N., "Building Generic User Interface Tools: An Experience with Multiple Inheritance", *OOPSLA '91*, pp.89-96
- [O4] de Champeaux, D., et al, "Formal Techniques for OO Software Development (PANEL)", *OOPSLA '91*, pp. 166-170
- [O5] Kilov, H., "Object concepts and bibliography", *ACM SIGPLAN Notices*, Vol 26, N 10, October 1991, pp. 11-12
- [O6] Leavens, G. T., "Introduction to the Literature on Object-Oriented Design, Programming and Languages"
- [O7] Dewhurst, S., Stark, K., "Programming in C++"
- [O8] Hayes, F., Coleman, D., "Coherent Models for Object-Oriented Analysis", *OOPSLA '91*, pp.171-183
- [O9] Ishikawa, Y., "Communication Mechanism on Autonomous Objects", *OOPSLA '92*, pp. 303-314
- [O10] Schaschinger, H., "ESA - An Expert Supported OOA Method and Tool", *ACM SIGSOFT SOFTWARE ENGINEERING NOTES*, Vol 17, N 2, Apr 1992, pp.50-56
- [O11] Coad, P., "Finding Objects: Practical Approaches", *OOPSLA '91 (Addendum to the Proceedings)*, pp.17-19
- [O12] Kerth, N. L., "A Structured Approach to Object-Oriented Design", *OOPSLA '91 (Addendum to the Proceedings)*, pp. 21-43
- [O13] Holibaugh, R., "Object Oriented Modelling", *OOPSLA '91 (Addendum to the Proceedings)*, pp. 73-78

- [O14] Lenkov, D., Monegan, M., "Object Management and Tool Integration Mechanisms in Object-Oriented Program Development Environments", OOPSLA '91 (Addendum to the Proceedings), pp. 79-82
- [O15] Simmel, S. S., "Object-based Visual Programming Languages", OOPSLA '91 (Addendum to the Proceedings), pp. 99-106
- [O16] Gibson, E., "Flattening the learning curve: educating object-oriented developers", JOOP, February, 1991, pp. 24-29
- [O17] Benoit, C., Bidoit, M., "SPOKE: an object-oriented programming environment", JOOP, February, 1991, pp. 30-39
- [O18] Hurson, A. R., Pakzad, S. H., "Object-Oriented Database Management Systems: Evolution and Performance Issues", IEEE COMPUTER, February, 1993, pp.48-60
- [O19] Salt, J. D., "Making objects work for you - mapping OOA onto MODSIM II"

## **Simulação**

- [S1] Warnecke, H.-J., Steinhilper, R., Zeh, K.-P., "Simulation as an integral part of an effective planning of flexible manufacturing systems (FMS)"
- [S2] Larsen, N. E., Alting, L., "Requirements to Scheduling Simulation Systems"
- [S3] Sztrimbely, W. M., Weymouth, P. J., "Dynamic process plant simulation and scheduling: an expert systems approach", SIMULATION, March, 1991, pp. 175-178
- [S4] Zeigler, B. P., Chi, S., "Model-Based Architecture Concepts for Autonomous Systems Design and Simulation", Intelligent and Autonomous Control, pp. 57-78
- [S5] Pflug, G. Ch., Prohaska, M., "The entity-connection approach to modelling and simulation", SIMULATION, October, 1990, pp. 226-235
- [S6] Swinehart, K. D., Blackstone, J. H., "Simulating a JIT/kanban production system using GEMS", SIMULATION, October, 1991, pp. 262-269
- [S7] Banks, J., "The simulation of material handling systems", SIMULATION, November, 1990, pp. 261-270
- [S8] Sydow, A., "Hierarchical Concepts in Modelling and Simulation"
- [S9] Standridge, C. R., Pritsker, A. A. B., "Using Data Base Capabilities in Simulation"
- [S10] Kiran, Ali S., et al, "An integrated simulation approach to design of flexible manufacturing systems", SIMULATION, February, 1989, pp. 47-52
- [S11] Pruetz, J. M., Vasudev, V. K., "MOSES: Manufacturing Organization Simulation and Evaluation System", SIMULATION, January, 1990, pp. 37-59
- [S12] Schroer, B. J., "A Simulation Assistant for Modeling Manufacturing Systems", SIMULATION, November, 1989, pp. 201-206
- [S13] Ketcham, M. G., et al, "Information structures for simulation modeling of manufacturing systems", SIMULATION, February, 1989, pp. 59-67

## **Sistemas de Software**

- [W1] Saradhi, M., "Systems Modelling and Description", ACM SOFTWARE ENGINEERING NOTES, Vol 17, N 2, Apr 1992, pp. 57-63
- [W2] Batory, D., O'Malley, S., "The Design and Implementation fo Hierarchical Software Systems with Reusable Components", ACM Transactions on Software and Methodology, Vol 1, N 1, October 1992, pp. 355-398

## **Algoritmos de Controlo**

- [C1] Borges Sousa, J., Lobo Pereira, F., " A Receding Horizon Strategy for the Hierarchical Control of Manufacturing Systems"
- [C2] Kimenia, J., Gershwin, S. B., "An Algorithm for the Computer Control of a Flexible Manufacturing System", IIE Transactions, December, 1983, pp. 353-363

## **Outros Sistemas**

- [T1] Seliger, G., Viehweger, B., Wieneke, B., "Decision support for planning flexible manufacturing systems"

- [T2] "MOD-NET Project"  
[T3] Warnecke, H. J., "Modularized Production Control", Manufacturing Review, Vol 4, N3, September 1991, pp. 168-181  
[T4] "CIM System Planning Toolbox"  
[T5] Engelke, H., et al, "Integrated Manufacturing Modeling System", IBM Journal Research Development, Vol 29, N 4, July, 1985, pp. 343-355

### **Diversos**

- [D1] Lu, H., Ooi, B.-C., Goh, C.-H., "On Global Multidatabase Query Optimization", SIGMOD RECORD, Vol 21, N 4, December, 1992, pp. 6-11



## **2.2 Publicações**

## ENDIEL 93

**SIMCOH - Um Ambiente de Simulação para Planeamento e  
Controlo Hierárquico de Processos de Manufactura**

Fernando Mascarenhas, João Madureira, Rui Furtado, João Tasso Borges de  
Sousa  
DEEC - FEUP, R. dos Bragas, 4099 Porto Codex

Palavras-chave:

Simulação, Controlo hierárquico, Sistemas de manufactura,  
Planeamento.

## 1. Introdução

Este projecto insere-se numa linha de investigação desenvolvida por um grupo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na área do planeamento e controlo hierárquico de processos de manufactura. O objectivo deste trabalho consiste em desenvolver um ambiente de simulação de sistemas de manufactura com vista a avaliar o desempenho conjunto de estratégias hierárquicas de planeamento e controlo. Este ambiente de simulação tem dois objectivos diferentes:

1. Visa apoiar investigação desenvolvida pelo grupo.
2. Pretende constituir uma ferramenta de apoio ao planeamento e controlo de processos de manufactura reais.

O primeiro ponto impõe alguns requisitos particulares para o ambiente de simulação, nomeadamente modularidade e capacidade de integração e teste de diversos algoritmos de planeamento e controlo da produção. A sua utilização como mecanismo de apoio à decisão requer alguns cuidados a nível de interfaces com o utilizador e com os sistemas de gestão de bases de dados dos processos de manufactura em consideração.

As potencialidades desta ferramenta permitem que seja utilizada para estudos de natureza estratégica, na optimização de processos ou no dimensionamento de novos sistemas.

Esta ferramenta de simulação está a ser desenvolvida utilizando a linguagem de simulação MODSIM em ambiente UNIX e permite a incorporação de algoritmos desenvolvidos em C.

## 2. Relações com outros trabalhos

Nos últimos anos tem-se assistido ao aparecimento de novas abordagens ao planeamento e controlo de processos de manufactura. Estas abordagens visam ultrapassar as dificuldades encontradas pelas técnicas tradicionais de planeamento e controlo de produção na adaptação de ambientes de manufactura flexíveis a uma dinâmica de mercado de características inteiramente novas. De facto, as características particulares destes problemas revelaram uma área fértil para aplicação de novos paradigmas de outras áreas do conhecimento. Na área do controlo assume particular relevância, pelo seu pioneirismo, a abordagem hierárquica definida por Kimemia e Gershwin [1983] que constitui um ponto de partida para uma série de refinamentos e extensões (ver Gershwin [1987], [1989] e Perkins [1990]) que são objecto de investigação actual. Para ultrapassar algumas das dificuldades relativas à resolução de problemas de optimização associados a esta metodologia Borges de Sousa [1992] propõe uma abordagem que consiste, numa primeira fase, em construir um

modelo dinâmico do sistema de manufatura organizado de forma a reflectir a sua estrutura hierárquica natural. Seguidamente, define-se um problema de optimização local para cada subsistema cuja resolução será coordenada de modo a maximizar uma dada função de desempenho global. Enquanto que a pequena dimensão do problema de optimização para cada subsistema advém da natureza local e do curto horizonte temporal considerado no nível hierárquico inferior, para o problema de controlo óptimo global (ver Lobo Pereira [1992]), esta resulta da simplificação do modelo dinâmico através da agregação de recursos num pequeno número de famílias (cujos membros diferem por pequenas variações dos parâmetros). De particular relevância é o trabalho desenvolvido por Albus (1991) no NBS, National Bureau of Standards. Este trabalho baseia-se na denominada teoria de inteligência definida por este autor e pretende definir uma estrutura hierárquica de elementos inteligentes para o controlo de sistemas de manufatura. Esta arquitectura encontra-se já implementada no NBS e em Albus (1991) dá-se conta dos resultados obtidos.

A consideração destas novas abordagens ao planeamento e controlo requer a definição de novos ambientes de simulação com funcionalidades adequadas à sua representação e teste. Os requisitos para estes ambientes de simulação impõem um conjunto de especificações extremamente complexas para os mesmos. Larsen (1989) apresenta um conjunto de directrizes para o desenvolvimento de um sistema de simulação adequado a este tipo de abordagens. Um primeiro esforço nesse sentido foi desenvolvido no Instituto Fraunhofer por Warnecke (1983). Darakananda (1989) desenvolveu um ambiente de simulação designado Hiercsim para o estudo do controlo hierárquico de processos de manufatura. As funcionalidades destes ambientes constituem uma ferramenta muito importante na análise de sistemas de manufatura reais.

### 3. Requisitos do sistema

O ambiente SIMCOH visa a simulação integrada do planeamento e controlo hierárquico de processos de manufatura, satisfazendo diversos requisitos de modo a permitir a análise do comportamento da planta com os mais variados tipos de algoritmos de planeamento, sequenciamento e controlo, e regras de despacho.

Este ambiente tem uma estrutura de carácter modular e aberto, de modo a possibilitar a evolução de cada um dos módulos que o constituem de forma independente. Pretende-se, assim, incorporar todas as vantagens que caracterizam os sistemas modulares e hierárquicos.

O SIMCOH possibilita também a incorporação de algoritmos de planeamento e controlo, possivelmente desenvolvidos noutras linguagens (que não o MODSIM), e que poderão ser usados para modelizar os diversos níveis de decisão existentes numa empresa.

Na sequência deste último requisito, esta ferramenta servirá de apoio ao desenvolvimento e teste de diversos algoritmos de planeamento e controlo, bem como ao desenvolvimento de novos sistemas de manufatura e à modificação da configuração de sistemas já existentes.

O SIMCOH incluirá também a possibilidade de incorporação de custos associados às diversas actividades existentes no sistema.

Continuando com a descrição dos requisitos do ambiente proposto é de notar a sua capacidade para o apoio à gestão de uma carteira de encomendas, característica que facilitará a tarefa dos agentes de decisão de alto nível, que terão agora menos dificuldades e incertezas aquando da proposta de uma importante encomenda por um cliente.

A possibilidade de aplicação de filosofias de produção como o "Just-in-time" está também contemplada, através de uma fácil integração no sistema existente.

Quanto ao ambiente de simulação, que será posteriormente descrito, será permitida a sua interligação ao sistema de planeamento da planta, beneficiando das vantagens

associadas a esse facto.

Finalmente a interface, tanto com os utilizadores nos diversos nveis de deciso como com os outros sistemas (nomeadamente com o sistema de gesto de bases de dados da planta fabril), dever ser flexvel de modo a permitir uma fcil extraco dos parmetros relevantes a modelizao da planta.

#### 4. M3dulos do sistema

No SIMCOH 3 possvel distino de trs nveis hier3rquicos de planeamento, modelizados pelos m3dulos Superior, Intermdio e Inferior. Estes m3dulos constituem a ess3ncia do sistema, que se representa na figura 1.

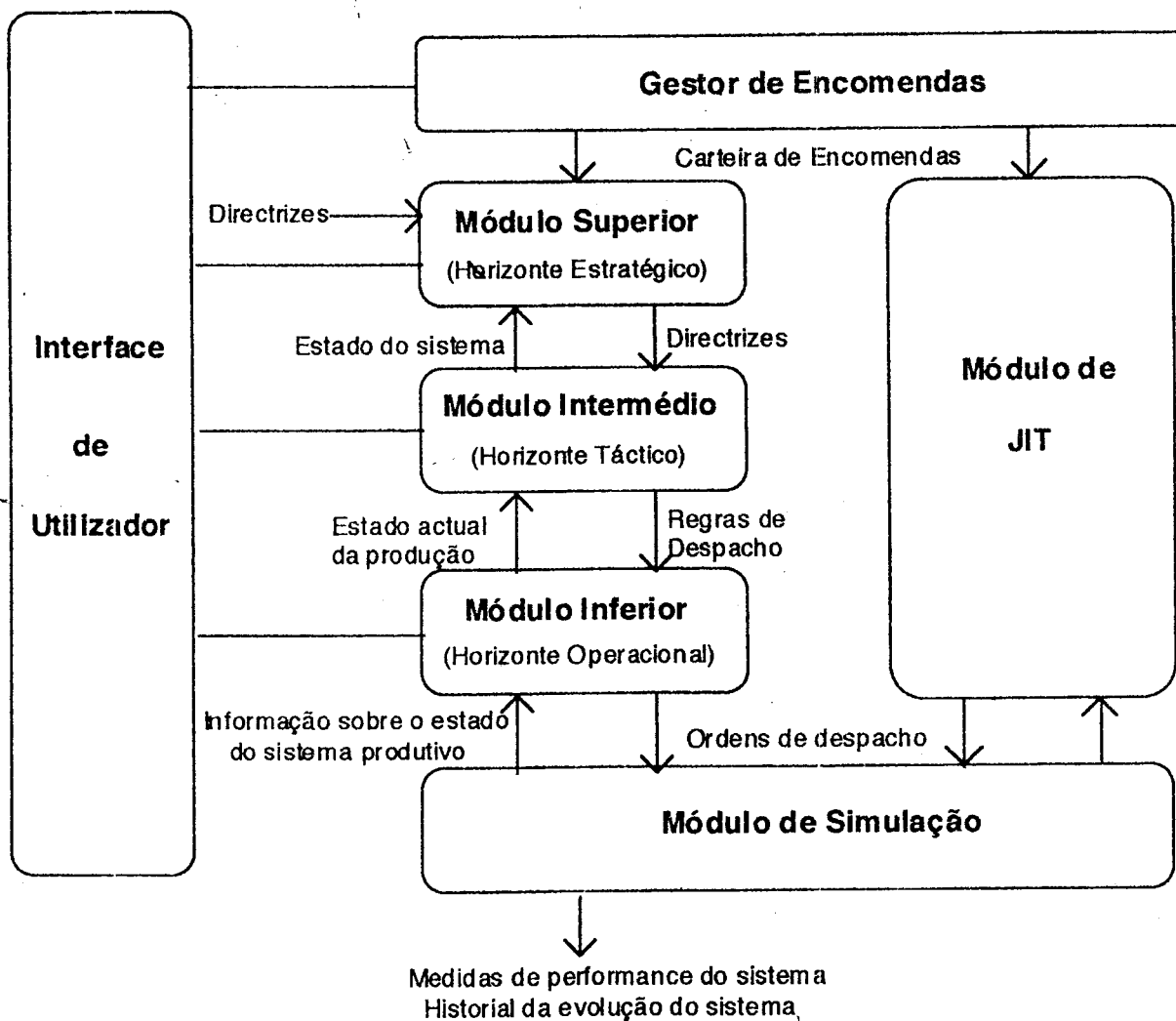


Figura 1. Esquema funcional do sistema

O módulo gestor de encomendas tem como função a elaboração e gestão da carteira de encomendas, de acordo com a capacidade de produção disponível. Este módulo pode ser parte integrante do ambiente ou de um sistema gestor de encomendas já existente na empresa.

O módulo superior é o módulo responsável pelo planeamento estratégico. Para tal efeito, recebe a carteira de encomendas do módulo gestor de encomendas e, de acordo com um conjunto de directivas estratégicas especificadas pelo utilizador, efectua o planeamento a longo prazo, com a possibilidade de recorrer a algoritmos de controlo óptimo.

Utilizando informação acerca do estado da produção já calendarizada, fornecida pelo módulo intermédio, é possível efectuar correcções sobre o planeamento já efectuado. A interacção com o módulo gestor de encomendas, permite verificar a possibilidade de uma encomenda poder ser satisfeita dentro do prazo previsto.

O módulo intermédio é o responsável por transformar um conjunto de directrizes de produção a médio prazo em regras de despacho a serem adoptadas pelo módulo inferior. Estas regras serão adaptadas ao estado actual da planta fabril, fornecido pelo módulo inferior, segundo um conjunto de directivas especificadas pelo utilizador.

O módulo inferior transforma as regras de despacho em ordens de despacho para cada máquina, para um horizonte temporal curto, de acordo com a informação recebida acerca do estado actual da planta, do módulo de simulação.

A aplicação do sistema de produção Just-In-Time ao processo produtivo é também possível, através do módulo JIT. Este módulo não é mais que um "curto-circuito" dos três módulos inferior, intermédio e superior. Assim, a carteira de encomendas (planeamento a longo prazo) é directamente transformada em ordens de despacho (planeamento a curto prazo) de acordo com a filosofia JIT.

Estas ordens de despacho são transmitidas à planta, modelizada pelo módulo de simulação. Este módulo simula o comportamento da planta em relação ao tipo de planeamento e controlo especificado pelos módulos superiores. Para avaliação do comportamento da planta, são coleccionadas um conjunto de medidas de performance e o historial da evolução temporal do sistema.

Pretende-se que os módulos tenham o menor acoplamento possível, para o que se definiu uma interface de comunicação e um protocolo de acesso entre os módulos.

Do ponto de vista de um módulo superior, o módulo imediatamente inferior oferece um serviço que encapsula todo o processamento subjacente e a informação apresentada tem um nível de abstracção correspondente ao do módulo utilizador do serviço.

O utilizador tem acesso a estes módulos através de uma interface gráfica flexível.

Através do interface de utilizador é possível aceder internamente a cada módulo, especificando o tipo de planeamento desejado a cada nível, de forma independente dos demais módulos. É também possível ao utilizador testar cada módulo independentemente dos outros. O interface é também usado no módulo de simulação para definir o layout da planta, à custa de módulos, numa forma semelhante à preconizada pelos sistemas de simulação Simscript e Extend.

## 5. Conclusões

As especificações que presidiram à elaboração do manual do desenvolvimento deste ambiente preconizaram o seu desenvolvimento em 3 fases: módulo de simulação e inferior, intermédio e superior. Actualmente encontra-se em fase de teste o primeiro módulo. Os resultados obtidos até ao momento indicam que constitui um ambiente apropriado para diminuir o fosso entre o desenvolvimento de novas teorias e a sua implementação em sistemas reais.

O ambiente SIMCOII, para além de apoiar a actividade de investigação do grupo, poderá servir de sistema de apoio à decisão no planeamento e controlo de processos de manufactura reais. Estas capacidades permitem ainda que seja utilizado para estudar estratégias de posicionamento no mercado com vista a assegurar uma vantagem

competitiva, essencial para a sobrevivência das empresas.

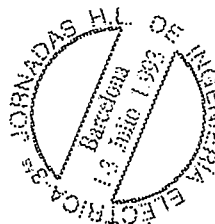
## Referências

- Kimemia, J. & Gershwin, S. B., (1983), "An Algorithm for the Control of Flexible Manufacturing System", IEE Transactions, Vol. 15, N. 4, pp. 353-362.
- Gershwin, S. B., (1987), "A Hierarchical Framework for Manufacturing Scheduling: A Two Machine Example", Proc. of the 26th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 651-656.
- Gershwin, S. B., (1989), "Hierarchical Flow Control: A Framework for Scheduling and Planning Discrete Events In Manufacturing Systems", Proc. of the IEEE, Vol 77, No. 1, pp. 195-209.
- Perkins, J. R. & Kumar P. K., (1989), "Stable, Distributed, Real Time Scheduling of Flexible Manufacturing / Assembly / Disassembly Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, No.2, pp. 139-148.
- Borges de Sousa, J. & Lobo Pereira, F. (1992) "A Hierarchical Framework for the Optimal Flow Control of Manufacturing Systems", Rensselaer's Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, New York, United States, pp. 278-286.
- Borges de Sousa, J. & Lobo Pereira, F. (1992) "Optimal Control for the Long-term Planning of Manufacturing Systems", International Conference on Economics/Management and Information Technology, Tokyo, pp 145-148.
- Lobo Pereira, F, Borges de Sousa (1992) "A Differential Inclusion Algorithm for Optimal Control Problems", IEEE Control and Decision Conference, Tucson, United States, pp. 1538-1540.
- Albus, J., Quintero R., Lumia, R., Herman M. & Kilmer R. (1991), "A Reference Model Architecture for ARTICS", Manufacturing Review vol. 4, no. 3, September 1991.
- Larsen N. E. (1989), "Simulation: A Concept for Production Scheduling", Ph. D. Dissertation, Laboratory of Processing and Production Engineering, Technical University of Denmark.
- Warnecke, H. J. (1983), "Neue Entwicklungen zur flexiblen Automatisierung der Teilefertigung, VDI-Z Vol. 125, N. 20.
- Darakananda, B. (1989), "Simulation of a Manufacturing Process Under a Hierarchical Control Structure", Master's Thesis, MIT.

# Um Ambiente de Simulação para Planeamento e Controlo Hierárquico de Processos de Manufatura

João Tasso Borges de Sousa  
Fernando Mascarenhas  
João Madureira  
Rui Furtado

Instituto de Sistemas e Robótica,  
DEEC - FEUP,  
R. dos Bragas, 4099 Porto Codex



## RESUMO

O desenvolvimento de sistemas integrados de planeamento e controlo de processos de manufatura faz apelo à consideração de técnicas de natureza diversa para responder aos problemas que se colocam a todos os níveis desses processos. A investigação e o desenvolvimento de tais sistemas requer a consideração de ambientes de teste específicos, versáteis e modulares. Neste artigo apresenta-se o ambiente de simulação SIMCOH cujas especificações correspondem aos requisitos expostos.

Palavras-chave: Simulação, Controlo hierárquico, Sistemas de Manufatura, Planeamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Este projecto insere-se numa linha de investigação desenvolvida no Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto na área do planeamento e controlo hierárquico de processos de manufatura. O objectivo deste trabalho consiste em desenvolver um ambiente de simulação de sistemas de manufatura com vista a avaliar o desempenho conjunto de estratégias hierárquicas de planeamento e controlo. Este ambiente de simulação tem três objectivos diferentes:

1. Apoio à investigação de novas metodologias;
2. Constituir uma ferramenta de apoio ao planeamento e controlo de processos de manufatura;
3. Apoio à avaliação do design de sistemas produtivos.

A satisfação destes objectivos impõe um conjunto particular de requisitos para o sistema tais como, modularidade e capacidade de integração e teste de diversos algoritmos de planeamento e controlo da produção a vários níveis de decisão.

A sua utilização como mecanismo de apoio à decisão requer cuidados especiais na definição de interfaces com o utilizador e com os sistemas de gestão de bases de dados dos processos de manufatura em consideração.



As características apontadas permitem que esta ferramenta seja utilizada para estudos de natureza estratégica, na optimização de processos ou no dimensionamento de novos sistemas.

O SIMCOH está a ser desenvolvido utilizando a linguagem de simulação MODSIM em ambiente UNIX e permite a incorporação de algoritmos desenvolvidos noutras linguagens de alto nível, nomeadamente C.

## 2. RELAÇÕES COM OUTROS TRABALHOS

Nos últimos anos tem-se assistido ao aparecimento de novas abordagens ao planeamento e controlo de processos de manufactura. Estas abordagens visam ultrapassar as dificuldades encontradas pelas técnicas tradicionais de planeamento e controlo de produção na adaptação de sistemas de manufactura a uma dinâmica de mercado de características inteiramente novas em que a agilidade da resposta do sistema desempenha um papel importante. De facto, as características particulares destes problemas revelaram uma área fértil para aplicação de novos paradigmas de outras áreas do conhecimento. Na área do controlo assume particular relevância, pelo seu pioneirismo, a abordagem hierárquica definida por Kimemia e Gershwin [1] que constitui um ponto de partida para uma série de refinamentos e extensões ([2], [3] e [4]) que são objecto de investigação actual. Para ultrapassar algumas das dificuldades relativas à resolução de problemas de optimização associados a esta metodologia em [5] é proposta uma abordagem que consiste, numa primeira fase, em construir um modelo dinâmico do sistema de manufactura organizado de forma a reflectir a sua estrutura hierárquica natural. Seguidamente, define-se um problema de optimização local para cada subsistema cuja resolução será coordenada de modo a maximizar uma dada função de desempenho global. Enquanto que a pequena dimensão do problema de optimização para cada subsistema advém da natureza local e do curto horizonte temporal considerado no nível hierárquico inferior, para o problema de controlo óptimo global ([6] e [7]), esta resulta da simplificação do modelo dinâmico através da agregação de recursos num pequeno número de famílias (cujos membros diferem por pequenas variações dos parâmetros). De particular relevância é o trabalho desenvolvido por Albus [8] no NBS, National Bureau of Standards. Este trabalho baseia-se na denominada teoria de inteligência definida por este autor e pretende definir uma estrutura hierárquica de elementos inteligentes para o controlo de sistemas de manufactura.

A consideração destas novas abordagens ao planeamento e controlo requer a definição de novos ambientes de simulação com funcionalidades adequadas à sua representação e teste. Os requisitos para estes ambientes de simulação impõem um conjunto de especificações extremamente complexas para os mesmos. Em [9] são apresentados um conjunto de directrizes para o desenvolvimento de um sistema de simulação adequado a este tipo de abordagens. Um primeiro esforço nesse sentido foi desenvolvido no Instituto Fraunhofer [10]. Darakananda [11] desenvolveu um ambiente de simulação designado Hiercsim para o estudo do controlo hierárquico de processos de manufactura. As funcionalidades destes ambientes constituem uma ferramenta muito importante na análise de sistemas de manufactura reais.

## 3. REQUISITOS DO SISTEMA

O ambiente SIMCOH visa a simulação integrada do planeamento e controlo hierárquico de processos de manufactura, satisfazendo diversos requisitos, de modo a permitir a análise do comportamento da planta com os mais variados tipos de algoritmos de planeamento, sequenciamento e controlo, e regras de despacho.

Este ambiente tem uma estrutura de carácter modular e aberto, possibilitando a evolução de cada um dos módulos constituintes de forma independente. Pretende-se assim incorporar todas as vantagens que caracterizam os sistemas modulares e hierárquicos.

Este aspecto do sistema possibilitará também a sua utilização como ferramenta de apoio ao desenvolvimento, teste e avaliação de algoritmos de planeamento e controlo, bem como no desenvolvimento de novos sistemas de manufactura ou na reconversão de processos já existentes. É também possível a incorporação de custos associados às diversas actividades existentes no sistema.

Pretende-se que o sistema apoie a gestão de uma carteira de encomendas, característica que facilitará a tarefa dos agentes de decisão de alto nível na negociação de prazos de entrega.

Quando julgado adequado, permitir-se-á também avaliar a possibilidade de aplicação da filosofia de produção "Just-in-time" ao sistema produtivo, através de um módulo próprio.

Todo o sistema correrá sobre uma interface de utilizador suficientemente flexível para cobrir as necessidades dos utilizadores, nos diversos níveis de decisão, fornecendo o nível de abstracção adequado.

#### **4. ARQUITECTURA DO SISTEMA**

A consideração dos requisitos atrás expostos, a complexidade dos tipos de sistemas endereçados e a modularidade requerida conduziram à adopção de uma estrutura hierárquica para a arquitectura do sistema.

Esta arquitectura, para além de traduzir a hierarquia do processo de decisão, permite ainda a definição de estruturas de controlo descentralizadas, em cada nível hierárquico. Pretende-se, desta forma, que o sistema global seja composto por um conjunto de subsistemas que, embora integrados numa estrutura hierárquica, possuam uma capacidade de decisão autónoma que lhes assegure uma melhor capacidade de reacção e adaptação às modificações que ocorrem dentro dos parâmetros e competências correspondentes.

Neste sistema distinguem-se três níveis hierárquicos de planeamento e controlo, modelizados pelos Módulos Superior, Intermédio e Inferior, representados na figura 1.

Cada um dos Módulos Superior, Intermédio e Inferior tem capacidade de decisão num horizonte rolante de planeamento compatível com o lugar que o mesmo ocupa na hierarquia do sistema.

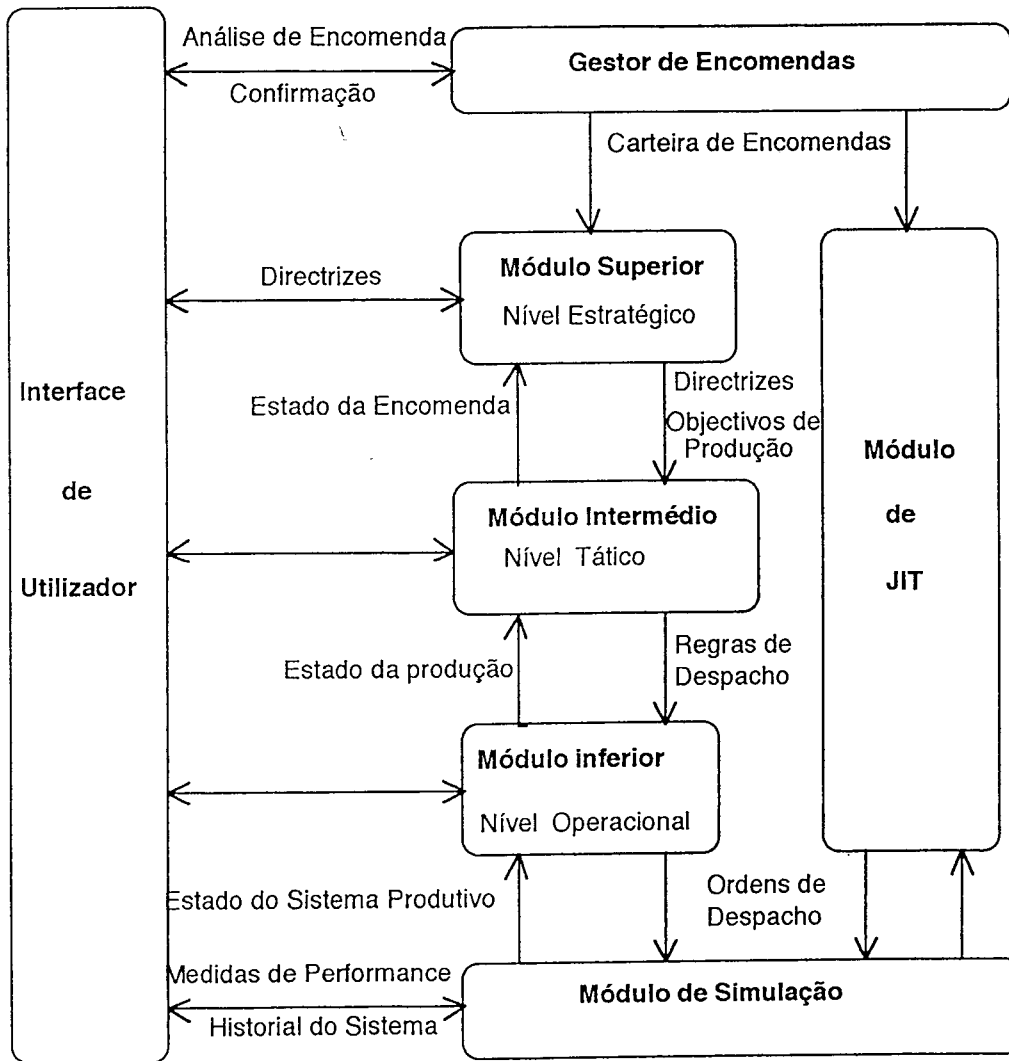
Cada módulo estabelece objectivos para o módulo que se lhe segue na hierarquia e dele recebe informações relativas ao seu estado. Do ponto de vista de um módulo superior, o módulo imediatamente inferior oferece um serviço que encapsula todo o processo subjacente. Desta forma, a abstracção da informação e a definição dos objectivos são as mais adequadas a cada nível.

Os objectivos e directrizes de produção para um determinado nível determinam o escalonamento da produção para o horizonte de planeamento correspondente. Este horizonte é dividido em subperíodos, cada um com objectivos próprios. Os objectivos do subperíodo actual são passados ao módulo imediatamente abaixo na hierarquia, passando a constituir os macro-objectivos para o horizonte de planeamento (rolante) correspondente. Por sua vez, o módulo imediatamente abaixo na hierarquia providencia informação acerca do estado de cumprimento dos objectivos para ele fixados. Esta informação tem um nível de abstracção compatível com o

do módulo superior cliente do serviço. Esta informação é utilizada por este módulo para analisar o estado actual do cumprimento das suas ordens, determinando a necessidade de intervenção, por modificação das ordens anteriormente enviadas, se for caso disso.

Um módulo pode invocar a intervenção do módulo imediatamente acima na hierarquia caso seja impossível cumprir os objectivos para ele especificados no horizonte temporal actual. Este processo é recursivo, até se atingir um nível com poder de decisão suficiente para solucionar o problema.

A modificação das directivas e objectivos especificados pelo nível imediatamente superior implica o começo de um novo horizonte temporal, para o nível inferior.



**Figura 1. Esquema funcional do sistema**

Seguidamente iremos descrever, com mais detalhe, os vários componentes do sistema.

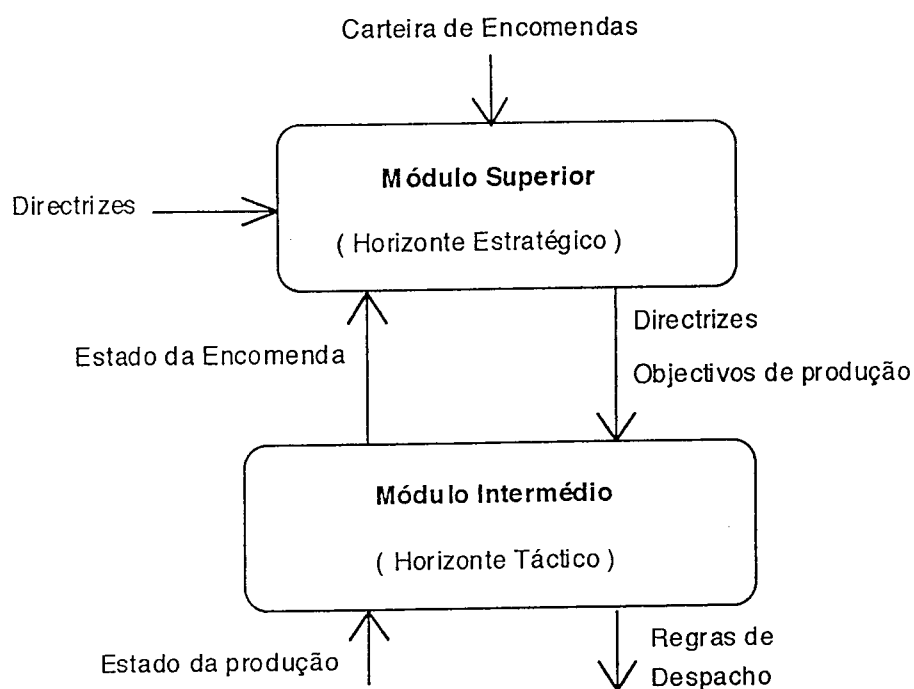
## 4.1 GESTOR DE ENCOMENDAS

O Módulo Gestor de Encomendas tem como função a elaboração e gestão da carteira de encomendas da empresa, de acordo com a capacidade de produção disponível. Este módulo pode ser parte integrante do ambiente, ou pertencer a um sistema gestor de encomendas já existente na empresa.

A consideração deste módulo na estrutura do sistema permite estabelecer considerações acerca do perfil das carteiras de encomendas mais ajustadas às capacidades instaladas e às estratégias de produção adoptadas. Este módulo poderá revestir-se de particular importância na redefinição de objectivos e reestruturação de uma empresa.

## 4.2 NÍVEIS DE DECISÃO ESTRATÉGICO E TÁTICO

Os níveis de decisão estratégica e tática são modelizados pelos Módulos Superior e Intermédio, representados na figura 2. Estes módulos constituem, na prática, a estrutura de decisão do sistema.



**Figura 2. Níveis de Decisão Estratégica e Tática do Sistema**

Um dos objectivos que presidiram à definição dos requisitos do sistema foi a capacidade de incorporar algoritmos de natureza diversa para resolução dos problemas que se colocam em cada nível do sistema.

O Módulo Superior é o responsável pelo planeamento estratégico e tem como função essencial compatibilizar no tempo, a carteira de encomendas com a capacidade de produção disponível, de acordo com um conjunto de objectivos e directivas especificados.

Tem um horizonte de actuação a longo prazo. Este período de actuação é dividido em sub-períodos, cada um com o seu objectivo de produção, susceptível de sofrer alterações. Os objectivos e directivas referentes ao sub-período actual são passados ao Módulo Intermédio, e este subperíodo irá representar o horizonte temporal de actuação do Módulo Intermédio. Entre outras metodologias, e com elas cooperando ou não, considere-se a possibilidade de incorporar, a este nível, algoritmos de controlo óptimo [7] para determinação das taxas de produção agregadas do sistema.

De acordo com a informação acerca do estado da produção relativamente ao especificado, fornecida pelo Módulo Intermédio, é possível efectuar correcções sobre o planeamento já calendarizado para os restantes subperíodos do horizonte rolante.

A partir da interacção com o Módulo Gestor de Encomendas (a descrever à frente) é possível determinar a possibilidade de satisfação de uma encomenda dentro de um dado prazo.

O Módulo Intermédio é o responsável pelo planeamento tático, transformando um conjunto de directrizes e objectivos de produção a médio prazo em regras de sequenciamento/despacho a serem adoptadas pelo Módulo Inferior, de acordo com o estado actual do sistema produtivo.

A partir do "feedback" que recebe do Módulo Inferior, é função do Módulo Intermédio determinar a necessidade de alteração das regras de sequenciamento/despacho enviadas, de forma a se adaptar às modificações da produção e/ou do sistema produtivo.

### 4.3 NÍVEL OPERACIONAL DE DECISÃO E EMULAÇÃO DA PLANTA

A simulação do processo produtivo é o resultado da interacção dos Módulos Inferior e de Simulação, representados na figura 3. Estes módulos representam a estrutura operacional da planta fabril.

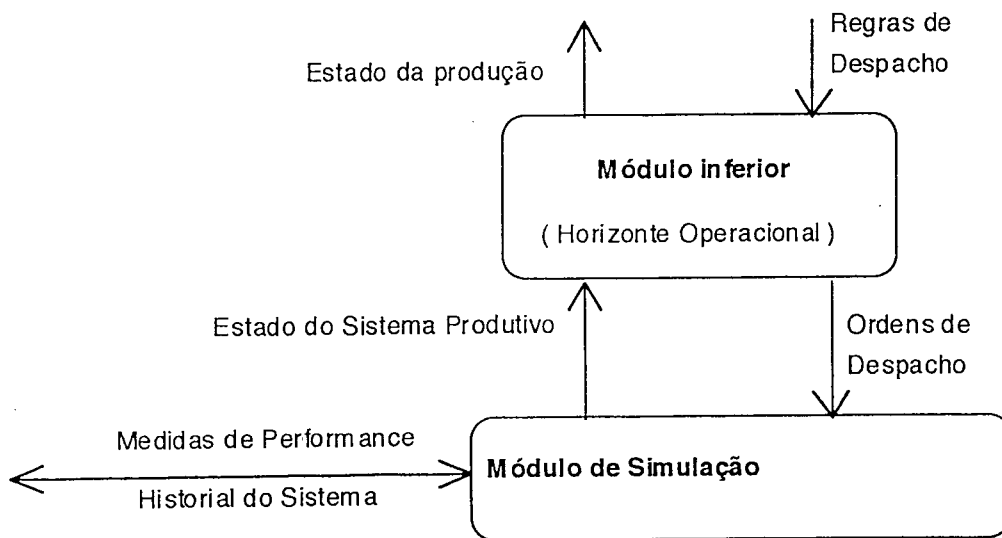


Figura 3. Nível Operacional de Decisão e Emulação da Planta Fabril

O Módulo Inferior desempenha a função de sequenciador/"Dispatcher". Funciona com um horizonte temporal curto adaptado às exigências de operação em tempo real.

Tem como função o planeamento operacional, transformando as regras de sequenciamento/despacho, fornecidas pelo Módulo Intermédio, em ordens de despacho, a lançar nos instantes apropriados. É pois função do Módulo Inferior controlar directamente a simulação pela determinação do próximo evento externo, em função da informação que recebe sobre o estado do sistema produtivo.

O Módulo de Simulação emula o comportamento da planta fabril relativamente ao tipo de planeamento e controlo especificado pelos módulos superiores. Para isso contém toda a informação referente à planta fabril e a todos os aspectos do processo produtivo.

Este módulo transforma as ordens de despacho recebidas do Módulo Inferior em transições de estado do modelo de simulação. A evolução do sistema é determinada pelos eventos externos (determinados pelo Módulo Inferior) e pelos eventos internos, consequência da simulação (como por exemplo o fim de uma operação). O estado actual do sistema é passado ao Módulo Inferior, para a determinação do próximo evento externo.

É também da incumbência deste módulo coleccionar um conjunto de estatísticas relevantes para a avaliação da performance do planeamento e controlo especificados.

Os Módulos Inferior e de Simulação poderiam ser integrados num módulo só. Optou-se, no entanto, por efectuar esta separação por esta representar a estrutura natural que se encontra num processo real, com supervisores e operadores, com funções distintas de controlo e execução, respectivamente.

#### **4.4 APLICAÇÃO DA FILOSOFIA JUST-IN-TIME**

A avaliação da aplicabilidade da filosofia de produção "Just-in-time" pode ser feita recorrendo ao Módulo de JIT. Permite ainda verificar a influência de parâmetros, como o número de kanbans, sobre o funcionamento do sistema.

De uma forma simplista, este módulo pode ser encarado como um "curto-circuito" dos Módulos Superior, Intermédio e Inferior, na medida em que transforma a carteira de encomendas (encarada num horizonte a longo prazo) num conjunto de ordens de produção a serem enviadas à planta fabril. De salientar que num sistema produtivo JIT baseado em kanbans, apenas se tem como evento externo o lançamento da produção de um novo lote, estando a partir de aí definido todo o processo de geração de eventos internos intrínseco ao sistema de controlo da produção.

#### **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O ambiente SIMCOH, para além de apoiar a actividade de investigação do grupo, poderá servir de sistema de apoio à decisão no planeamento e controlo de processos de manufactura reais. Estas capacidades permitem ainda que seja utilizado para estudar estratégias de posicionamento no mercado com vista a assegurar uma vantagem competitiva, essencial para a sobrevivência das empresas.

Para o desenvolvimento do sistema optou-se por uma linguagem de programação Object-Oriented, por se adaptar bem à estrutura e conceitos de hierarquia. O recurso à técnica de desenvolvimento em espiral implicou o desenvolvimento de pequenos protótipos.

O projecto SIMCOH encontra-se actualmente na fase de identificação de objectos, ao nível do Módulo de Simulação, e na fase de especificação das estrutura de bases de dados e de "interfaces" com o utilizador.

## REFERÊNCIAS

- (1) Kimenia, J. & Gershwin, S. B., (1983), "An Algorithm for the Control of Flexible Manufacturing System", IEE Transactions, Vol. 15, N. 4, pp. 353-362.
- (2) Gershwin, S. B., (1987), "A Hierarchical Framework for Manufacturing Scheduling: A Two Machine Example", Proc. of the 26th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 651-656.
- (3) Gershwin, S. B., (1989), "Hierarchical Flow Control: A Framework for Scheduling and Planning Discrete Events In Manufacturing Systems", Proc. of the IEEE, Vol 77, No. 1, pp. 195-209.
- (4) Perkins, J. R. & Kumar P. K., (1989), "Stable, Distributed, Real Time Scheduling of Flexible Manufacturing / Assembly / Disassembly Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.34, No.2, pp. 139-148.
- (5) Borges de Sousa, J. & Lobo Pereira, F. (1992) "A Hierarchical Framework for the Optimal Flow Control of Manufacturing Systems", Rensselaer's Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, New York, United States, pp. 278-286.
- (6) Borges de Sousa, J. & Lobo Pereira, F. (1992) "Optimal Control for the Long-term Planning of Manufacturing Systems", International Conference on Economics/Management and Information Technology, Tokyo, pp 145-148.
- (7) Lobo Pereira, F, Borges de Sousa (1992) "A Differential Inclusion Algorithm for Optimal Control Problems", IEEE Control and Decision Conference, Tucson, United States, pp. 1538-1540.
- (8) Albus, J., Quintero R., Lumia, R., Herman M. & Kilmer R. (1991), "A Reference Model Architecture for ARTICS", Manufacturing Review vol. 4, no. 3, September 1991.
- (9) Larsen N. E. (1989), "Simulation: A Concept for Production Scheduling", Ph. D. Dissertation, Laboratory of Processing and Production Engineering, Technical University of Denmark.
- (10) Warnecke, H. J. (1983), "Neue Entwicklungen zur flexiblen Automatisierung der Teilefertigung, VDI-Z Vol. 125, N. 20.
- (11) Darakananda, B. (1989), "Simulation of a Manufacturing Process Under a Hierarchical Control Structure", Master's Thesis, MIT.

15h49

# A Simulation Environment for Hierarchic Planning and Control of Manufacturing Systems

J. BORGES DE SOUSA, F. LOBO PEREIRA, F. MASCARENHAS, R. FURTADO, J. MADUREIRA

*Institute of Systems and Robotics (ISR) and Electrical Eng. Dept., Porto University, Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex, Portugal*

**Abstract.** This paper concerns the development of a hierarchic framework for the planning and scheduling of a class of manufacturing systems. Also addressed is the design of a simulation environment for the development and testing of the practical results of this hierarchic approach. The proposed architecture is composed of three hierarchical levels where a two way information flow, assuming the form of a state feedback control, is obtained through the consideration of a receding horizon strategy. At a higher level, an optimal control problem is solved by an iterative algorithm in order to define the production rates for the various subsystems. At the lower levels, these control strategies are further refined in such a way that all sequences of real-time operations are fully specified.

**Key words.** Manufacturing Processes, Production Control, Simulation, Optimal Control, Optimization.

## 1 INTRODUCTION

This paper addresses the development of a hierarchical framework for the planning and scheduling of a class of manufacturing systems. In this framework the paradigm of dynamical optimization plays an important role. In order to avoid the "curse of dimensionality" associated to the solution methods proposed by other authors [1], a hierarchic control structure [2] is considered. Next, the three stages of this control structure are briefly described.

The first stage consists in solving an optimal control problem which defines optimal production rates for each activity type as a function of time. This step coordinates the operations in the various groups of machines and, not only spots the "critical" ones, but also specifies their optimal behavior. The optimal control problem is solved by using an algorithm of the projected gradient type [3] which uses, as stopping condition, the necessary conditions of optimality in the form of a maximum principle of Pontryagin. Since there might be more than one admissible schedule corresponding to a given pattern of production rates, two additional stages are required in order to fully specify a schedule which satisfies the technological constraints, i.e., flow and machine specifications.

To endow this hierarchic scheme with desirable closed-loop properties a receding horizon strategy [4] is considered. This strategy provides a simple method to obtain state feedback control laws from the sequential solution of open-loop control problems.

A modular hierarchical structure for a simulation environment is defined in order to test the performance of a manufacturing system under this control framework. This structure is composed by three levels, representing the strategic, tactical and operational decision levels. Each level has a receding horizon of actuation which is divided in sub-periods, each with its own goals. The goals for the first subperiod constitute the goals for the current horizon of the level down in the hierarchy. The output of the lowest module in the hierarchy, reflecting all the decision process, is the input for a simulation module, representing the manufacturing system.

This paper is organized as follows. After describing related work at section 2 we present the proposed planning and control framework at section 3. The main design features of the simulation environment are referred to in section 4. Finally, we conclude by stating some closing remarks at section 5.

## 2. RELATED WORK

Several researchers have recently used a control systems approach to address the production planning and scheduling problem.

Concerned with computational tractability and the definition of control policies based on realistic models, Kimemia [5] developed a pioneering approach to the production control of manufacturing systems with failure-prone machines. A multilevel hierarchical control algorithm, involving stochastic optimal control at the first level, is proposed. The notion of "hedging point" was also introduced to designate the optimal buffer level with which to hedge against future failures.

By basing the optimal control algorithm on the Maximum Principle of Pontryagin, the "curse of dimensionality" intrinsic to dynamic programming methods used by Hauric [6] is avoided. Relationships between both optimality results provided by a result in [7] asserting that the adjoint variable in the Maximum Principle of Pontryagin is the generalized gradient w.r.t. the state variable of the value function as a solution to the Hamilton Jacobi equation.

The recent work of Sharifnia [8] and of Connors [9] is particularly interesting since, by using the continuous flow production models, it relates directly to the approach presented in this paper. Sharifnia obtained

a linear formulation for the continuous flow approximation of the system and proposes to re-solve the problem whenever significant random disturbances or deviations from the optimal continuous targets are observed. Connors [9] have focused on myopic control policies which require some important simplifications on the original problem formulation and, consequently, do not necessarily yield an optimal solution.

Of particular importance is the work developed by Albus [10], in the National Bureau of Standards. This work concerns with the definition of a hierarchical structure of intelligent elements for the control of flexible manufacturing systems. The requirements for these new simulation environments imply a set of extremely complex specifications. Larsen [11] presents a set of directives for the development of a simulation system that addresses these specifications. A first effort in this direction has been presented by Warnecke [12] in the Fraunhofer Institute. Darakananda [13] has designed a simulation environment denominated Hiersim for studying the hierarchical control of manufacturing processes.

## 3. PLANNING AND CONTROL FRAMEWORK

### 3. 1. INTRODUCTION

The class of manufacturing systems addressed in this paper might be generally described by the following features.

$N$  - time units of the planning horizon.

$p$  - product index,  $p=1, \dots, P$  and  $i$  - index for product type.

$m$  - machine-type index,  $m=1, \dots, M$ .

$n_m$  - number of parallel machines of type  $m$ .

$\tau_{m,i}$  - processing time for product-type  $i$  at machine-type  $m$ .

$\tau_m$  - vector of processing times at a machine of type  $m$ .

$U_m$  - production rates constraint set for the group of machines of type  $m$ .

$U_p$  - constraint set for the input rates of products.

$\Omega = U_1 \cup \dots \cup U_M \cup U_p$  - control constraint set for the whole system

( $\cup$  denotes union of sets).

At time  $t$ :

$u_{m,i}(t)$  - production rate for product-type  $i$  at the group of machines of type  $m$ .

$u_m(t)$  - vector of production rates for the group of machines of type  $m$ .

$u_p(t)$  - vector of the input rate of products of type  $p$ .

$u(t) = \text{col}(u_1(t), \dots, u_M(t), u_1(t), \dots, u_p(t))$

$b_{m,i}(t)$  - number of products of type  $i$  at the buffer of the group of machines of type  $m$ .

$b_m(t)$  - vector of buffer contents for the group of machines of type  $m$ .

$b(t) = \text{col}(b_1(t), \dots, b_M(t))$ .

$z$  - number of components of vector  $b$ .

$d_p(t)$  - demand profile for products of type  $p$ .

$d(t) = \text{col}(d_1(t), \dots, d_p(t))$  vector of the demand profile for the system.

The following notation was adopted:

$X = \text{col}(A, B)$  is a matrix where the first lines are those of matrix  $A$  and, the last ones of matrix  $B$ .

$I$  and  $\psi$  represent the identity matrix and the zero matrix respectively.

$\phi$  - vector whose components are zero.

The approach to solve the whole problem consists in embedding the three level hierarchy of solution stages in a receding horizon framework.

### 3.2. HIGHER LEVEL STAGE

It is relatively straightforward to show that, at time  $t$ , the vector of production rates  $u_m(t)$  corresponding to a group of  $n_m$  flexible machines of type  $m$  satisfies the following equations:



$$\tau_m \cdot u_m(t) \leq n_m \quad \forall m \quad (1)$$

$$u_m(t) \geq \phi \quad (2)$$

where this inequality should be understood component wise.

In this problem the vectors of buffer's contents  $b(t)$  and production rates  $u(t)$  play the role of state and control variables respectively

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^N [c^T b(t) + d^T O u(t-1)] \quad \text{subject to} \quad (3)$$

$$b(0) = b_0 \quad (\text{Initial state})$$

$$b(t+1) - b(t) = A u(t) \quad (\text{Dynamic equation})$$

$$b(t) \geq \phi \quad (\text{nonnegative buffer's content})$$

$$u(t) \in \Omega \quad (\text{capacity constraints})$$

$$\sum_{k=0}^t O \cdot u(k) \geq d(t+1) \quad (\text{satisfaction of demand})$$

where the last four relationships should hold for  $t=0, 1, \dots, N-1$  and be understood component wise. The vectors  $c$  and  $d$  represent weighting factors and the matrix  $O$  permits to select the production rates of assembled or final products from the vector of production rates  $u$ .

The cost function should always reflect a trade-off between amenable mathematical formulation and adequate description of system's objectives. The first component of the cost function (3) penalizes buffer's contents in order to decrease the cycle time for all products. The second component and the last constraint will ensure that the production rates are kept as close as possible to demand.

Unfortunately this problem is not a standard one to which the Maximum Principle [14] might be applied directly. However if the change of variables considered in [2] is adopted the original problem is converted into the following standard problem.

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^N c(t)^T \bar{b}(t) \quad \text{subject to} \quad (4)$$

$$\bar{G} \cdot \bar{b}(0) = \bar{b}_0 \quad (5)$$

$$\bar{b}(t+1) - \bar{b}(t) = \bar{A} u(t), \quad t=0, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$\bar{G} \cdot \bar{b}(t) \geq \bar{d}(t) \quad t=1, \dots, N \quad (7)$$

$$u(t) \in \Omega \quad (8)$$

The algorithm developed in [3], is used in order to solve the optimal control problem. This is an iterative procedure using feasible descent directions to search for a control function satisfying necessary conditions of optimality [15]. Note that this algorithm uses the maximum principle for optimal control problems in the absence of state constraints such as (7). However, an exact penalization result in [15] implies that the given problem has the same solution as another one with almost the same data except that there are no state constraints and the cost functional becomes penalized as in [2]:

$$\sum_{t=1}^N [c^T \bar{b}(t) + K e^T \max\{0, \bar{d}(t) - \bar{G} \cdot \bar{b}(t)\}] \quad (9)$$

where  $e = \text{col}(1, 1, \dots, 1)$ , the max operation is understood component wise and  $K$  is a sufficiently large positive constant.

The algorithm described in [3] will produce, after a number of iterations, a control policy yielding a local minimum of the cost functional. Note that in this case, these conditions are also sufficient. Under fairly standard hypothesis on the data, this algorithm produces a strictly decreasing sequence of controls converging to a global minimizer of the optimal control problem.

### 3.3. MIDDLE LEVEL STAGE

Generally speaking this level takes the optimal production rates, generated by the high level stage, and general production guidelines, imposed by management. An algorithm for this level can be generally described along the following lines:

#### Algorithm

**Step 1:** Define a list of the machines ordered by their criticality. In [7], it is shown that the adjoint variable, defined in the statement of the maximum principle, provides this valuable piece of information.

**Step 2:** Concentrate first on the definition of production targets and a set of rules to achieve them, for the most critical machines in such a way that the sequence of operations is globally compatible, i.e., satisfying flow and machine constraints. Note that, since the higher level optimal control problem took into account realistic dynamic constraints at least one such a sequence exists.

**Step 3:** Repeat the procedure of step 2 for the set of machines with the critical degree immediately below in such a way that the set of all sequenced operations is coherent. Repeat this step until all the operations has been sequenced.

This procedure does not guarantee the uniqueness of the resulting machine schedule. This marginal degree of freedom might be used in order to cope with unexpected events arising in practical situations.

### 3.4. LOW LEVEL STAGE

This stage is responsible for the dispatching of operations and activities in real-time. The rules passed by the middle level stage are used in order to fulfill the production goals established by the same level. These rules may be quite simple and depend on the more or less complex class of general production guidelines imposed by the high level management. In [16] the properties of some operational rules are studied.

### 3.5. RECEDING HORIZON STRATEGY

Next, we present an algorithm that will provide the upper and middle levels of the hierarchy with robustness to random perturbations and with adaptativity to time-varying environments. The implementation of this strategy to the higher level stage is described as follows. Denote the optimal control problem with initial conditions  $(x_0, t_0)$  and horizon  $N$ , as described in section 3.2, by  $P^N(x_0, t_0)$ .

#### Algorithm

**Step 1:** Initialization

$i=0, t_i=t_0, x_i^*(t_i)=x_{0i}$  and fix  $T_i=T$ .

**Step 2:** High level control problem

Solve  $P^T(x_i^*(t_i), t_i)$  for the interval  $[t_i, t_i+T_i]$ . This yields the optimal process  $(u_i^*, x_i^*)$  on  $[t_i, t_i+T_i]$ .

**Step 3:** Low level control problem.

Solve this problem on  $[t_i, t_f]$ , where  $t_f \in (t_i, t_i+T_i]$

**Step 4:** Preparation to new iteration

Let  $i=i+1, t_i=t_f, x_i^*(t_i)=x_{i-1}^*(t_f)$ . Pick a new  $T_i$ . Go to step 2.

A key observation on the above algorithm consists in the fact that the Maximum Principle used to solve the higher level optimal control problem in step 2 yields an open loop control that depends on the initial state. Thus, by closing the loop, robustness and stabilizing properties for the dynamic control system may be achieved under very mild hypothesis [4].

These same principles may be easily applied to the middle level stage.

## 4. SIMULATION ENVIRONMENT

### 4.1. MAIN FEATURES

The planning and control complexity of the addressed systems requires the use of a dedicated simulation environment in order to define and validate control strategies and evaluate system performance under several alternative designs.

We adopted an hierarchical architecture for the global simulation environment. This environment is composed of a set of subsystems that, although integrated in the hierarchical structure, possess some autonomous decision capability which assures some degree of adaptativity to unpredicted events.

Next, we briefly describe the main features of this simulation environment.

1. Three levels (strategic, tactical and operational) of decision and control which encompass the ones in the proposed approach.

2. The planning and control horizon of each level and the respective information abstraction follow the principle of increasing abstraction with decreasing precision. Therefore the horizon at the strategic level is an order of magnitude greater than the corresponding time horizon at the tactical level. The same principle applies to the tactical and operational levels.

3. It is possible to incorporate financial costs within this simulation environment.

4. A flexible structure of interfaces was defined to allow the incorporation of various types of alternative algorithms at each level.

5. Interfaces between adjacent levels in the hierarchy were defined in order to permit a two way information change: commands and guidelines downwards and data providing the feedback for corrective actions in the opposite direction. Exchange of information and commands occurs only between adjacent levels.

6. Each level encapsulates all the underlying process by representing information at its abstraction level.

7. The decision structure of each level incorporates a receding horizon strategy, as described in section 3.5.

8. The simulation environment provides user interfaces for each level of abstraction.

9. There is an independent module consisting of a plant emulation

model permitting to emulate its behavior. This allows the experimentation of various alternative policies without interfering with the current plant model.

10. An object oriented language is being used, to take advantage of its inherent ability to represent hierarchical concepts.

In the following subsections we describe in detail the components of the simulation environment.

#### 4.2. STRATEGIC AND TACTICAL LEVELS

The strategic and tactical levels constitute the decision structure of the system.

##### Strategic level

At this level, the user interface permits to establish general production guidelines and policies.

This module is responsible for the strategic planning on a long term horizon. Its main function is to assure the compatibility between the available production capacity and the order portfolio, in accordance to the established objectives and directives. This module produces production objectives for each of the sub-periods of the current horizon.

Among other methodologies, and with or without their cooperation, optimal control algorithms may be used in order to determine the system's aggregated production rates.

The planning horizon is divided into several sub periods, each one with its own production objectives, susceptible of being modified.

The interface with the middle level module is bi-directional:

- the objectives, production rates and directives concerning the actual sub period are passed to the middle level module.
- information about the behavior of the middle level module by this module at the end of present sub-period.
- asynchronous requests from the middle level module will make it possible to make corrections to the current plan, over the remaining sub periods of the receding horizon whenever it is necessary.

##### Tactical level

The module is responsible for the tactical planning. To achieve this goal a set of medium term production rates, directives and objectives is transformed into dispatching/sequencing rules to be adopted by the low level module.

The user interface permits to add or delete rules from this module.

The temporal horizon of interest was passed by the higher level module and corresponds to the first sub-period of its planning horizon.

The interface with the low level module bi-directional:

- production targets and dispatching /sequencing rules concerning the actual sub period are passed to the low level module.
- information about the state of the behavior of the low level module, is passed synchronously to this module at the end of present sub-period.
- asynchronous requests from the low level module may determine the need to change the dispatching /sequencing rules already sent, in order to cope with unexpected events.

#### 4.3. OPERATIONAL LEVEL AND PLANT EMULATION

The simulation of the production process is the result of the interaction between the low level module and the plant emulation module. These modules represent the operational structure of the plant.

The low level module performs the role of a dispatcher, working with a narrow time horizon. It is also the responsibility of this module to collect a set of relevant statistics for the performance evaluation of the specified planning and control.

The simulation module emulates the plant's behavior under the planning and controls strategies specified by the upper modules.

This module transforms the dispatching rules received by the inferior module into state transitions of the plant model. The system's evolution is controlled by the external events (determined by the low level module) and by the internal events (which occurs within this module). The system's actual state is passed to the lower level module for the determination of the next external event.

#### 5. CONCLUSIONS

By using most recent optimal control theoretic developments, we formulate a planning and control framework for manufacturing systems which takes into account the true dynamic nature of these systems as pointed out by current trends. In order to test and evaluate the performance of this approach, a simulation environment was defined. Besides supporting the group research activity, this simulation tool may

be used as a decision support system in the planning and control of real manufacturing processes.

#### REFERENCES

- [1] French, S., Sequencing and Scheduling. Wiley, New York, 1982.
- [2] Sousa, J. B. and Pereira, F. L. "A Hierarchical Framework for the Optimal Flow Control Of Manufacturing Systems", Proceedings of the Rensselaer's Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, NY, 1992, pp. 278-286.
- [3] Pereira, F. L. and Sousa, J. B. "An Algorithm for Optimal Control Problems". 15th IFIP Conference on System Modelling and Optimization, Zurich, Switzerland, 1991, pp. 215-217.
- [4] Vinter, R. B. and Michalska, H. (1991). "Receding Horizon Control for Nonlinear Time-Varying Systems", Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 75-76.
- [5] Kimemia, J. and Gershwin, S. B. "An Algorithm for the Control of a Flexible Manufacturing System", *IEE Transactions*, Vol. 15, No. 4., 1983, pp. 353-362.
- [6] Hauric, A. and L'Ecuyer, P. "Approximation and Bounds in Discrete Event Dynamic Programming", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.31, No.3, 1986, pp. 227-235.
- [7] Vinter, R. B. and Wolenski, P. R. (to appear) "Adjoint variables and the value function in optimal control theory: the measurable case", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*.
- [8] Sharifnia, A. "Performance of Production Control Methods Based on Flow Control Approach", Proceedings of the Rensselaer's Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, NY, 1992, pp. 184-191.
- [9] Connors, D., Feigin, G. and Yao, D. "Scheduling Semiconductor Lines Using a Fluid Network Model", Proceedings of the Rensselaer's Third International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Troy, NY, 1992, pp.174-183.
- [10] Albus, J., Quintero R., Lumia, R., Herman M. & Kilmer R., "A Reference Model Architecture for ARTICS", *Manufacturing Review* vol. 4, no. 3, September 1991.
- [11] Larsen N. E., "Simulation: A Concept for Production Scheduling", Ph. D. Dissertation, Laboratory of Processing and Production Engineering, Technical University of Denmark, 1989.
- [12] Warnecke, H. J., "Neue Entwicklungen zur flexiblen Automatisierung der Teilefertigung", VDI-Z Vol. 125, N. 20, 1983.
- [13] Darakananda, B., "Simulation of a Manufacturing Process Under a Hierarchical Control Structure", *Master's Thesis*, MIT, 1992.
- [14] Halkin, H. "A Maximum Principle of the Pontryagin Type for Systems Described by Nonlinear Difference Equations", *SIAM Journal of Control*, Vol. 4, No. 1, 1966, pp 91-111.
- [15] Clarke, F. H. Optimization and Nonsmooth Analysis. Wiley, New York, 1983.
- [16] Perkins, J. R. & Kumar P. K., "Stable, Distributed, Real Time Scheduling of Flexible Manufacturing / Assembly / Disassembly Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol.34, No.2, 1989, pp. 139-148.



FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101627