

DEPARTAMENTO DE

ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais

FACULDADE DE ENGENHARIA

UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex – PORTUGAL

Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores



Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais

Isabel Cecília Correia da Silva Praça

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos de grau de mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de especialização de Informática Industrial)

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 1996

Isabel Cecília Correia da Silva Praça
(isp@tormentas.fe.up.pt)

Aos meus Pais

Resumo

O estudo de um caso concreto de um sistema de produção organizado em linhas de fabrico manuais originou a motivação para este trabalho de análise dos problemas inerentes ao balanceamento de linhas manuais, linhas de acção para a sua obtenção face à extrema variabilidade presente nesse tipo de sistemas, e da importância do recurso à simulação na avaliação de diferentes soluções.

Na primeira parte são abordados os principais conceitos e características da organização da produção em linhas de fabrico, particularmente no que diz respeito às linhas manuais. Relativamente ao seu balanceamento, problema NP-difícil, é feita a análise e comparação de algumas das regras heurísticas mais usadas na prática. Neste contexto surge a simulação como uma ferramenta que permite a avaliação e comparação de diferentes configurações para a linha, permitindo reduzir o risco de tomada de decisões pouco ou nada adequadas.

De seguida é estudada a simulação e as suas principais aplicações no âmbito dos sistemas de fabrico, características, tipos, e metodologia. Uma vez que a modelização é um dos passos mais importantes para a obtenção de resultados válidos, e consequente sucesso do recurso à simulação, é abordada mais pormenorizadamente do que as restantes fases. São ainda descritos alguns dos desenvolvimentos mais recentes neste campo. Particularmente relevante é a descrição de ferramentas de apoio ao desenvolvimento de simulações do tipo de eventos discretos.

Na última parte é feita a descrição das características e principais problemas do sistema de fabrico em estudo, mediante os quais foi especificado um sistema informático com módulos integrados de planeamento global, balanceamento de linhas, simulação, monitorização e controlo da produção. Foi desenvolvido um sistema informático dedicado à obtenção de balanceamentos e simulação de linhas de fabrico, e feita a análise e discussão da sua aplicação no estudo de exemplos concretos de produtos fabricados na empresa.

Palavras Chave: linhas de fabrico, balanceamento de linhas manuais, simulação

Abstract

The starting point to this work was the study of a production system organised as a set of manual flow lines. Several issues related to flow lines are described.

In first place the most important characteristics of the flow line organisation are described, particularly those concerning manual flow lines. The problem of balancing the lines, which is an NP-hard problem, is discussed and methods to solve it, such as heuristic rules, are analysed and compared. In this context simulation emerges as a framework to evaluate and compare different line organisations, helping to reduce the risk of taking wrong decisions.

The most important applications in the manufacturing systems field, the characteristics, types and methodology of simulation are described. Particular attention is devoted to the modelling phase, since it is one of the most important to the success of a simulation study. The most recent developments in this area are discussed, such as some frameworks that helps in the development of discrete event simulation applications.

Finally, the characteristics and most important problems of the production systems that served as a starting point to this work are described. The specification of a system, with integrated modules of aggregate planning, line balancing, simulation, monitoring and production control is made. The goal of this system is to help solving their problems and avoid wrong decisions. The module related to the line balancing and simulation was developed and the analysis of implementation issues is also made.

Key words: flow lines, manual flow lines balancing, simulation.

Résumé

L'étude d'un cas concret d'un systéme de production organisé en lignes de fabrication manuelles a donné lieu à se travail dánalyse des problémes liés au balancement de lignes manuelles, des lignes d'action pour son obtention par rapport à l'extréme variabilité qui existe dans ce type de systémes, et de l'importance du recors à la simulation dans l'évaluation du différentes solutions.

D'abord, on a abordé les principaux concepts et caractéristique de l'organisation de la produtcion en lignes de fabrication surtout en ce qui concerne les lignes manuelles. Par rapport à leur balancement, problémes NP-difficile, on a fait l'analyse et la comparaison de quelques régles heuristiques les plus utilisées dans l'action pratique. Alors, la simulation apparait comme un outil qui permet l'évaluation et la comparaison de différents configurations pour la ligne, permettant de reduire le risque de quelques prises de décision peu ou pas du tout adéquates.

Puis, on a etudié la simulation et ses principales utilisations dans le champ d'action des systémes de fabrication caractéristiques, types et methodologie. Comme le modelage c'est l'une des activités les plus importantes pour qu'on obtienne des résultats valables et, par conséquent le succés du recours à la simulation, on l'a abordé d'une façon plus detaillée que les autres phases. On a encore décrit quelques uns developpements les plus récents dans cet aspect. Ce qui est particuliérement digne de relief c'est la description d'outils d'appui au developpement de simulations du type d'événements discrets.

Finalement, on a fait la description des caractéristiques et des principaux problémes du systéme de fabrication quón est en train d'étudier à partir desquels on a spécifié un systéme informatique avec des modules integrés de plan global, balancement de lignes, simulation, contrôle de la production et recueil d'information. On a developpé un systéme informatique dédié à l'obtention de balancement et simulation de lignes de fabrication et on a fait l'analyse et la discussion de son application dans l'étude d'exemples concrets de produits fabriqués dans lénterprise.

Des mots-clés: lignes de fabrication, balancement de lignes manuelles, simulation

Índice

Resumo i

Agradecimentos xi

Acrónimos xiii

Capítulo 1 1

1. Introdução 1

1.1. Estrutura 3

Capítulo 2 5

2. Linhas de Fabrico 5

2.1. Introdução 5

2.2. Produção em massa 6

2.3. Princípios da produção em linhas de fabrico 7

2.3.1. Princípio do fluxo de trabalho 7

2.3.2. Uso e aprovisionamento de componentes normalizados 8

2.3.3. Princípio do movimento a menor distância 8

2.3.4. Divisão de operações 8

2.4. Pré-requisitos da produção em massa 8

2.5. Definições e Terminologia 9

2.5.1. Definições 9

2.5.1.1. Linhas de transferência 10

2.5.1.2. Linhas manuais ou linhas de montagem 10

2.5.1.3. Linhas de modelo único 10

2.5.1.4. Linhas multi-modelo 10

2.5.1.5. Linhas modelos-mistos 10

2.5.2. Terminologia 11

2.6. Projecto de linhas modelo único 13

2.6.1. Linhas simples 13

2.6.1.1. Heurísticas para balanceamento de linhas dado o tempo de ciclo 17

2.6.1.1.1. Método dos pesos posicionais 18

2.6.1.1.2. Regra do maior candidato 18
2.6.1.1.3. Comsoal 18
2.6.1.1.4. Heurística da Multi-Regra 19
2.6.1.1.5. Estudos comparativos 20
2.6.1.2. Heurísticas para balanceamento de linhas dado o número de postos de trabalho pretendido 21
2.6.1.3. Alternativas de auxílio ao balanceamento de linhas 22
2.6.1.4. Localização de postos de inspecção de qualidade 23
2.6.2. Linhas complexas 24
2.6.2.1. Variabilidade do operador 25
2.6.2.2. Tipos de linhas manuais 27
2.6.2.2.1. Linhas não mecânicas 27
2.6.2.2.2. Linhas com dispositivo rolante 28
2.6.2.3. Projecto de linhas manuais 30
2.7. Estudos de Simulação 32
2.7.1. Linhas de transferência 33
2.7.2. Linhas manuais 34
2.8. Conclusões 35

Capítulo 3 **37**

3. Simulação 37

3.1. Introdução 37
3.2. Aplicações no âmbito dos sistemas de produção 38
3.3. Vantagens 39
3.4. Entidades num estudo de simulação 40
3.5. Metodologia 42
3.6. Modelização 45
3.6.1. Taxonomia 47
3.6.1.1. Modelos Conceptuais 47
3.6.1.2. Modelos Declarativos 48
3.6.1.3. Modelos Funcionais 48
3.6.1.4. Multimodelos 49
3.6.2. Modelização Orientada a Objectos 50
3.6.2.1. Propriedades 51
3.6.2.2. Vantagens 52
3.6.2.3. Métodos 53
3.6.2.4. Estudo comparativo de metodologias 56
3.7. Tipos de simulação 57
3.7.1. Simulação de Eventos Discretos 58
3.7.1.1. Incremento fixo de tempo. 58
3.7.1.2. Avanço para próximo evento. 59
3.7.2. Simulação Contínua 61
3.7.3. Simulação Discreta/Contínua Combinada 61
3.7.4. Simulação de Monte Carlo 61
3.8. Ambientes de desenvolvimento 62

3.8.1. Ferramentas de Simulação 62
3.8.1.1. CPSim 62
3.8.1.2. +SIM 64
3.8.1.3. SimPack 64
3.8.1.3.1. Características do Sim++ 65
3.8.2. Ambientes genéricos para modelização e simulação 66
3.8.2.1. DEVS (*Discrete Event System Specification*) 66
3.8.2.2. SES/MB (*System Entity Structure/Model Base*) 70
3.8.3. Integração com Inteligência Artificial 71
3.8.3.1. Tileworld 72
3.8.3.2. MICE 73
3.8.3.3. Phoenix 73
3.8.3.4. Truckworld 74
3.8.3.5. MESS (*Multiple Event Stream Simulator*) 75
3.8.4. Simulação Distribuída e Paralela 77
3.8.4.1.1. Método conservativo 79
3.8.4.1.2. Método optimista 79
3.8.4.2. Exeter 80
3.8.4.3. PORTS (*Paralell, Optimistic, Real-Time Simulator*) 81
3.8.4.4. Simulação Distribuída Interactiva 82
3.8.4.5. Simulação Distribuída no apoio à tomada de decisões 84
3.9. Conclusões 86

Capítulo 4 **89**

4. Um Caso Prático 89

4.1. Introdução 89
4.2. Descrição 90
4.2.1. Organização 90
4.2.1.1. Direcção da produção 91
4.2.1.2. Gabinete técnico 91
4.2.1.3. Métodos e tempos 91
4.2.1.4. Planificação e controlo da produção 92
4.2.1.5. Corte 92
4.2.1.6. Montagem 92
4.2.1.6.1. Classificação das linhas de fabrico 93
4.2.1.7. Manutenção 94
4.2.1.8. Controlo final 94
4.2.1.9. Embalagem 94
4.2.1.10. Armazém 94
4.2.2. Fluxo produtivo 95
4.2.3. Planeamento e Gestão da Produção 96
4.2.4. Controlo da Produção 97
4.2.5. Alguns valores 97
4.2.6. Fluxo de informação 98
4.3. Sistema informático a desenvolver 101
4.3.1. Planeamento da Produção 102
4.3.1.1. Principais problemas 102
4.3.1.2. Objectivos 103
4.3.1.3. Principais funcionalidades e linhas de acção 103

4.3.1.4. Requisitos de informação 105
4.3.2. Balanceamento das linhas de montagem 105
4.3.2.1. Principais problemas 105
4.3.2.2. Objectivos 106
4.3.2.3. Principais funcionalidades e linhas de acção 106
4.3.2.4. Requisitos de informação 108
4.3.3. Simulação 108
4.3.3.1. Planeamento da Produção 109
4.3.3.2. Balanceamento das linhas de fabrico 109
4.3.3.3. Modelos 110
4.3.3.4. Tipo de simulação 111
4.3.4. Monitorização e Controlo 112
4.3.5. Conclusões 113
4.4. Modelo do Sistema 114
4.4.1. Modelo de Objectos 116
4.4.2. Modelo Dinâmico 122
4.4.3. Modelo Funcional 127
4.5. Sistema desenvolvido 128
4.5.1. Objectivos e funcionalidades 128
4.5.2. Balanceamento 129
4.5.3. Simulação 130
4.5.3.1. Eventos 132
4.5.3.1.1. Arranque 132
4.5.3.1.2. Pedido_Posto 133
4.5.3.1.3. Libertar_Posto 133
4.5.3.1.4. Criar_tipo_lote 134
4.5.3.1.5. Actualizar_rendimento 134
4.5.4. Aplicação do SIMBA 135
4.5.4.1. Discussão de resultados 137
4.5.4.1.1. Resultados obtidos para o Tempo de ciclo indicado na Ficha Técnica 137
4.5.4.1.2. Resultados obtidos para o Tempo de ciclo determinado pela maior operação 140
4.5.4.1.3. Resultados obtidos para as configurações sugeridas 144
4.5.5. Conclusões 145

Capítulo 5 **149**
5. Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento 149

Referências **154**
6. 154

Anexo A **A**
7. Produto #3030 A

Anexo B **B**
8. Produto #3830 B

Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Componentes do tempo de ciclo 11
Fig. 2.2 - Grafo de precedências de operações 12
Fig.2.3 - Balanceamento sem perdas 14
Fig. 2.4 - Balanceamento com perdas 15
Fig. 2.5 - Balanceamento com perdas em todos os postos 15
Fig. 3.1 - Entidades envolvidas num estudo de simulação 41
Fig. 3.2 - Metodologia de simulação 43
Fig. 3.3 - Taxonomia proposta por Fishwick 47
Fig. 3.4 - Fluxograma de funcionamento do mecanismo de avanço para próximo evento60
Fig. 3.5 - Implementação do DEVS sobre classes C++ 69
Fig. 3.6 - Arquitectura do sistema DDD 85
Fig. 4.1. - Organização 90
Fig. 4.2. - Configuração secção de montagem 93
Fig: 4.3. - Fluxo produtivo 95
Fig: 4.4. - Fluxo de informação 99
Fig. 4.5 - Primeira vista do modelo de objectos 116
Fig. 4.6 - Segunda vista do modelo de objectos 117
Fig. 4.7 - Terceira vista do modelo de objectos 118
Fig. 4.8 - Quarta vista do modelo de objectos 119
Fig. 4.9 - Quinta vista do modelo de objectos 120
Fig. 4.10 - Sexta vista do modelo de objectos 121
Fig. 4.11 - Primeira vista do modelo dinâmico 122
Fig. 4.12 - Segunda vista do modelo dinâmico 123
Fig. 4.13 - Terceira vista do modelo de objectos 124
Fig. 4.14 - Quarta vista do modelo dinâmico 125
Fig. 4.15 - Quinta vista do modelo dinâmico 126
Fig. 4.16 - Modelo Funcional 127

Fig. 4.17. - Grafo de Operações 129

Agradecimentos

Durante a realização desta dissertação recebi provas de amizade e solidariedade por parte de muitas pessoas. Assim, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

- ao Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho, na qualidade de orientador desta tese pelo total apoio e constante disponibilidade sempre manifestados durante o desenvolvimento daquela;
- ao Sérgio, por tudo...;
- ao Filipe e ao Luís, pela ajuda imprescindível que prestaram;
- à minha Irmã, que no último minuto lá se arrependeu e resolveu dar uma ajuda;
- à minha prima Ana, pelo PC e não só;
- ao Eng. Pina Marques por toda a documentação cedida e pelas várias conversas esclarecedoras;
- a todos os colegas, em particular as "crianças" e a "mamã", do Instituto de Sistemas e Robótica;
- à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Instituto de Sistemas e Robótica pela cedência de equipamentos e instalações imprescindíveis à realização deste trabalho;
- à JNICT concretamente ao Programa Praxis XXI pelo suporte financeiro.

A todos os meus amigos que me apoiaram, e especialmente aos meus Pais.

Acrónimos

DDD	Distributed Dynamic Decision making
DEVS	Discrete Event System Specification
DIS	Discrete Event Simulation
DoD	Department of Defense
FEL	Future Event List
FIFO	First-In First-Out
HCCL	Heterogeneous Container Class Library
MESS	Multiple Event Stream Simulator
SES/MB	System Entity Structure/Model Base
SIMBA	Sistema de Simulação e Balanceamento desenvolvido
TCL	Timed Common Lisp

Capítulo 1

Introdução

Um dos aspectos mais importantes para o sucesso e competitividade de uma empresa é o planeamento e gestão eficiente da produção. O fornecimento de um bom serviço aos clientes, com entrega dos produtos no prazo estabelecido e com a qualidade desejada, são factores indispensáveis para atingir e manter uma boa aceitação no mercado, com procura crescente dos bens produzidos. São, no entanto, vários os problemas a resolver e as decisões que têm que ser tomadas.

Com o planeamento procura-se realizar, de uma forma satisfatória, a afectação no tempo dos recursos disponíveis, com vista a alcançar um conjunto de objectivos previamente estabelecidos. São definidas as datas em que intervêm os diferentes participantes no processo produtivo (mão de obra, equipamentos, matérias primas, entre outros).

Os objectivos são múltiplos e muitas vezes conflituosos. Alguns exemplos são: o satisfazer atempadamente os pedidos dos clientes, fazendo face às flutuações do mercado; o maximizar o rendimento, utilizando ao máximo os recursos de produção; a necessidade de ser flexível para enfrentar a concorrência, sendo capaz de ajustar rápida e eficazmente os recursos disponíveis à produção de diferentes produtos; entre outros.

O recurso a sistemas informáticos é cada vez mais imprescindível, não só no que diz respeito à recolha, armazenamento e processamento de informação, mas, e cada vez mais, na elaboração de sistemas que permitam auxiliar a tomada de decisões a vários níveis. De entre estes salientam-se aqueles em que o risco de decidir erradamente é demasiado elevado.

Acresce ainda que a integração dos sistemas de fabrico, subjacente ao conceito de CIM, possibilita a gestão global de todo o sistema produtivo. Deste modo, em qualquer ponto do sistema de fabrico é possível aceder a toda informação sobre o estado do mesmo.

No âmbito do planeamento e gestão da produção, a obtenção de informação actualizada proveniente da planta fabril sobre a evolução do fabrico e o seu estado, permite corrigir atempadamente planeamentos estabelecidos face aos imprevistos sucedidos, reduzindo a possibilidade de implementar planos impossíveis de cumprir.

A análise de uma empresa do sector das confecções e a constatação das dificuldades que enfrentam no campo do planeamento e gestão da produção serviram de motivação à elaboração de um sistema informático integrado, com vista a auxiliar a tarefa de tomada de decisões pelos responsáveis dos vários sectores.

Os principais problemas resultam da forte componente de mão de obra envolvida, particularmente no que se refere à secção de montagem, na qual se concentram cerca de 80% dos recursos humanos. A complexidade desta secção resulta de o número de variáveis ser extenso, da extrema flexibilidade da configuração fabril, dada a simplicidade em alterar a topologia dos postos de trabalho, e da variabilidade inerente ao comportamento humano, que impede que as previsões quanto ao seu desempenho global sejam muito pouco precisas.

Se através de um correcto planeamento se podem estabelecer condições para o melhor desempenho desta secção, só através de balanceamentos optimizados para as várias linhas de fabrico se pode conseguir melhorar o rendimento. Assim são vários os problemas associados à gestão da produção. Em particular no que diz respeito ao balanceamento das linhas, problema do tipo NP-díficil, o recurso a regras heurísticas é frequente na tentativa de obter uma solução boa em tempo útil.

No caso das linhas manuais, a variabilidade dos tempos faz com que o projecto deste tipo de linhas seja muito mais complexo, sendo praticamente impossível conseguir balancear a linha. Mesmo os balanceamentos efectuados com recurso aos tempos *standard* de duração das operações, tempos estimados durante o projecto dos produtos, não garantem que a linha funcione de modo equilibrado dada a extrema variabilidade envolvida. A importância da variabilidade dos tempos para o projecto e operação das linhas de fabrico manuais torna necessária a avaliação de quais os factores que mais a influenciam e em que medida.

Surge neste âmbito a simulação como uma ferramenta que permitirá analisar e avaliar comparativamente diferentes soluções e determinar os factores fundamentais a um bom desempenho global do sistema.

A simulação é uma ferramenta particularmente útil na análise de sistemas complexos em que são vários os aspectos a ter em consideração e em que o risco de pôr em prática decisões pouco ou nada adequadas é demasiado elevado. Deve ser alvo de um desenvolvimento cuidado de modo a

que a informação fornecida seja válida. Os requisitos e objectivos da sua utilização devem ser claramente identificados e o sistema a simular deve ser analisado e modelizado adequadamente.

O desenvolvimento de um sistema informático em que se integrem módulos de:

- monitorização do estado da planta fabril, que permita obter em qualquer altura o estado actualizado do sistema;
- planeamento global, que englobe todas as secções do sistema de fabrico;
- balanceamento de linhas, onde se podem conseguir os melhores resultados em termos de aumento de rendimento;
- simulação, para que soluções alternativas possam ser analisadas fornecendo informação qualitativa e quantitativa que auxilie os responsáveis na tomada de decisões;

é um ponto a ser avaliado para ultrapassar as dificuldades de gestão e controlo do sistema, de modo a melhorar a competitividade da empresa.

1.1. Estrutura

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos, dos quais o primeiro é esta introdução que descreve a motivação e define em traços gerais os aspectos que vão ser abordados nos capítulos seguintes.

No segundo capítulo são abordados os principais conceitos e características da organização da produção em linhas de fabrico. As linhas de fabrico podem funcionar de modo diferente dado o tipo de recursos utilizados e produto em questão, contudo um dos aspectos comuns a todos a eles é a necessidade de distribuir o mais equilibradamente possível as diversas operações a realizar pelos postos de trabalho da linha. A este nível de balanceamento das linhas, os objectivos que se pretendem atingir, factores que o influenciam, principais problemas, algoritmos e regras para a sua obtenção são motivo de análise.

Particularmente no que diz respeito às linhas de fabrico manuais, os principais problemas, decorrentes da extrema variabilidade associada ao comportamento humano, e problemas daí decorrentes, são focados numa perspectiva de avaliação de quais os factores fundamentais a equacionar na tentativa de diminuir a complexidade associada ao seu projecto. Surge neste

contexto a simulação como uma ferramenta a considerar no estudo de sistemas de fabrico organizados em linhas.

O capítulo três aborda a simulação, suas principais aplicações no âmbito dos sistemas de fabrico, vantagens e metodologia. Sendo uma das fases mais importantes para o sucesso de um estudo de simulação, a modelização é analisada sob a perspectiva das vantagens que introduz, diferentes tipos existentes e quais os seus campos de aplicação, e cuidados a ter no desenvolvimento de modelos.

Uma vez que o recurso a ferramentas de simulação tem sido crescente, são várias as aplicações e ferramentas desenvolvidas. Algumas delas muito interessantes na medida em que auxiliam o desenvolvimento de aplicações de simulação, libertando o programador de alguns detalhes comuns à sua estrutura. É por isso feita uma descrição de alguns dos desenvolvimentos mais recentes e relacionados com o objectivo deste estudo.

Os principais problemas a enfrentar por uma empresa do sector das confecções para manter a sua competitividade no mercado e aumentar os rendimentos, factor que desencadeou a motivação para um estudo mais profundo sobre a organização do fabrico em linhas de montagem manuais e utilização de ferramentas de simulação nesse contexto, são analisados no capítulo quatro.

É feita a especificação das características de um sistema informático, com módulos integrados de planeamento global, balanceamento de linhas, simulação, monitorização e controlo da produção, a implementar na empresa para atingir os objectivos a que se propõe.

O desenvolvimento de modelos que sirvam de ponto de partida ao futuro sistema, e do módulo destinado ao balanceamento e simulação das linhas de fabrico foi um dos aspectos sobre o qual incidiu este trabalho.

No capítulo quatro são também apresentados os modelos e a estrutura e características do sistema desenvolvido, bem como a discussão e as conclusões da análise de resultados obtidos com o estudo do projecto da produção de dois produtos, habitualmente fabricados na empresa, recorrendo ao sistema implementado.

O quinto e último capítulo aborda as conclusões sobre o trabalho realizado e discute algumas perspectivas de desenvolvimento do mesmo.

Capítulo 2

Linhas de Fabrico

2.1. Introdução

Com o desenvolvimento de métodos mecanizados de produção surgiu uma nova forma de organizar o fabrico de grandes quantidades de produtos semelhantes, cuja procura é elevada, a produção em massa. Podem distinguir-se dois tipos de produção em massa: a produção em quantidade, associada ao fabrico de grandes quantidades de produtos em máquinas automáticas, e a produção em fluxo. Na produção em fluxo distingue-se a produção de fluxo de processo da produção em linhas de fabrico, destinadas ao fabrico de grandes quantidades de itens discretos e complexos, de que as linhas de montagem da "*Ford*" são o exemplo mais típico.

São vários os problemas associados à gestão da produção de linhas de fabrico. Como distribuir a sequência de operações a realizar pelos postos de trabalho? Qual deve ser a taxa de produção? Deve algum posto ser duplicado? A resposta a esta e outras questões nem sempre é fácil de obter. Nomeadamente no que diz respeito ao balanceamento das linhas, distribuição equilibrada das operações por postos de trabalho, problema do tipo NP-díficil, o recurso a regras heurísticas é frequente na tentativa de obter uma solução boa em tempo útil. Quanto maior a complexidade da linha mais dificuldades surgem em responder a estas e outras questões que então se colocam.

As linhas de fabrico que envolvem uma quantidade considerável de mão de obra tornam-se mais complexas devido à variabilidade de duração das operações, que é imposta pelas características inerentes ao comportamento humano, sendo por isso mais complexas de planear e gerir de modo eficiente. Factores não controláveis como o absentismo, os níveis e evolução da aprendizagem e a predisposição à realização das operações, contribuem em muito para essa complexidade.

Neste contexto surge a simulação como uma ferramenta que possibilita a análise e estudo das características e desempenho global das linhas de fabrico. Em condições de grande variabilidade a importância de uma ferramenta de simulação é notória na medida em que torna possível detectar a acumulação de peças entre postos de trabalho, e consequente detecção de estações gargalo, os tempos de utilização dos postos, e os dias necessários ao fabrico da totalidade dos produtos, informação indispensável para avaliar as configurações de linha alternativas.

2.2. Produção em massa

A produção pode ser organizada de diferentes modos [Groover, 87] de acordo com as características do produto a fabricar e o seu tipo de procura.

A produção em massa está associada à produção de grandes quantidades de produtos semelhantes, cuja procura é elevada.

O estímulo para a produção em massa surgiu com a invenção e crescente desenvolvimento de métodos mecanizados de produção.

O aspecto mais simples da produção em massa é a produção em quantidade, em que é usado equipamento específico para a produção contínua de grandes quantidades de produtos, por exemplo, a produção em máquinas de injecção de moldes plásticos.

Um outro aspecto da produção em massa diz respeito à produção de produtos mais complexos, cujo fabrico requer a utilização de mais do que um tipo de ferramenta ou equipamento, em que a principal característica é o fluxo do produto, sendo designada como produção em fluxo. Na produção em fluxo, podem considerar-se dois tipos distintos de produção:

- ▷ fluxo de processo: fabrico de grandes quantidades de produtos líquidos ou semilíquidos.
- ▷ linhas de fabrico: fabrico de grandes quantidades de itens discretos e complexos.

Embora a produção do tipo fluxo de processo, como a produção de produtos químicos e petróleo, envolva um investimento de capital considerável e o seu projecto seja complexo sendo crucial a sua operação eficiente, os problemas de gestão da produção envolvidos são menos complexos que os associados às linhas de fabrico de itens discretos e complexos. Este facto deve-se, em parte, à menor flexibilidade e alternativas de configuração existentes na produção do tipo fluxo produtivo, imposta pela natureza dos processos químicos que devem ocorrer.

Por outro lado, as linhas de fabrico, especialmente as manuais, apresentam, regra geral, problemas complexos de projecto e planeamento. Neste tipo de linhas é frequente a necessidade de acomodar o fabrico de uma variedade de produtos, além de estarem sujeitas a dificuldades de operação devido à ocorrência de acontecimentos como avarias de máquinas, absentismo, diferentes desempenhos de trabalho, e outros.

As responsabilidades em termos de gestão da produção são também diferentes em cada um dos tipos de produção em massa. No caso de fluxo de processo as responsabilidades são sobretudo dos engenheiros químicos que projectam os sistemas. Nas linhas de fabrico, os responsáveis pela produção enfrentam um número considerável de estratégias alternativas, uma vez que as restrições são apenas a natureza do produto e o rendimento que se pretende atingir, existindo alguma flexibilidade em termos da conjugação das operações envolvidas no processo de fabrico.

O tipo de produção no qual se insere a plataforma industrial, que serviu de base à análise e elaboração de um sistema para auxílio ao planeamento da produção, é o de produção segundo linhas de fabrico, sendo sobre ele que incide este estudo, deixando de lado o tipo de produção de fluxo de processo.

2.3. Princípios da produção em linhas de fabrico

Apresentam-se em seguida os princípios, ou características, mais relevantes no projecto de linhas, embora não seja obrigatório aplicá-los em cada caso específico. Servem sempre como pontos de referência ou aspectos a ter em consideração.

2.3.1.Princípio do fluxo de trabalho

Idealmente o trabalho, materiais ou produtos deveriam fluir regularmente através dos recursos de fabrico, tal acontece na produção por fluxo de processo, no entanto, na produção em linhas de fabrico as irregularidades são frequentes, sendo um dos principais objectivos a minimização dessas irregularidades. Desse modo o tempo que cada item passa na linha de fabrico é reduzido, tal como a quantidade de trabalho em curso de fabrico. A simultaneidade de operações é uma característica que deriva deste princípio.

2.3.2. Uso e aprovisionamento de componentes normalizados

As linhas de montagem dependem da disponibilidade de componentes normalizados, enquanto as linhas de fabrico devem produzir itens que respeitem intervalos de normalização específicos de acordo com o seu tipo.

2.3.3. Princípio do movimento a menor distância

Para assegurar a continuidade do fluxo, e a máxima utilização do espaço disponível, é essencial que o fluxo seja lógico e eficiente. Este princípio normalmente implica que as áreas de trabalho sejam adjacentes e ligadas através de equipamento de armazenamento ou manuseamento de materiais, como armazéns intermédios e tapetes rolantes.

2.3.4. Divisão de operações

Embora não seja estritamente um princípio, a divisão, racionalização ou especialização de operações, ou no caso das linhas manuais, divisão do trabalho, é uma importante característica da produção em linhas.

2.4. Pré-requisitos da produção em massa

Um pré-requisito fundamental da produção em massa, e também da produção em linhas, é a procura. Não só os níveis de procura, mas também a continuidade da procura. Na prática, a produção em linhas justifica-se para produtos com procura elevada e razoavelmente contínua. No entanto esta regra não é essencial, podendo a produção em linhas justificar-se para, por exemplo, a produção de itens para cumprimento de uma grande ordem de fabrico.

A natureza do produto irá determinar o tipo de produção em massa a ser utilizado. Consequentemente um pré-requisito para a produção em massa é a disponibilidade de um produto de fabrico adequado.

Alguns dos requisitos que devem ser satisfeitos de modo a que a produção em linha seja eficiente, e muito sumariamente, pois serão abordados em pormenor mais á frente, são o balanceamento da linha, fiabilidade, fornecimento e desenho do produto.

Para produzir um produto numa linha de fabrico, o total de trabalho necessário à sua produção tem de ser dividido, o mais equilibradamente possível, pelo trabalhadores ou equipamentos, ou seja, a linha tem de ser balanceada. O balanceamento da linha é essencial para que o fluxo seja contínuo, e para que se evite acumular excessivo trabalho entre postos.

Uma das características fundamentais das linhas de fabrico é, devido aos vários passos de fabrico serem tão interdependentes, o facto de a falha num ponto estender-se rapidamente a todas os outros postos de fabrico. É por isso essencial que os equipamentos sejam fiáveis e que seja adoptado um procedimento de manutenção apropriado.

É também essencial, para que a operação continuada das linhas seja eficiente, que os componentes e materiais necessários em cada ponto de fabrico se encontrem disponíveis. A falha de fornecimento de material, no início da linha ou em qualquer outro ponto, levará rapidamente ao cessar do fabrico.

O tipo de produto pode ou não revelar-se adequado à produção em linhas. O tipo de produção deve ser factor a ter em consideração durante o projecto detalhado dos produtos.

A decisão de adoptar ou não um fabrico em linha deve ser motivo de considerações económicas. Um dos aspectos a considerar é o nível de utilização do equipamento. No entanto outros factores devem ser avaliados, tal como a estabilidade da procura, fiabilidade do equipamento, e outros já referidos, bem como a utilização do capital investido.

Dada a quantidade de factores envolvidos, torna-se por vezes difícil concluir qual o modo de produção mais adequado a cada caso. Deste modo o recurso à simulação revela-se vantajoso ao permitir, na fase de projecto de fabrico de um produto, testar vários modos de organizar a produção com vista a utilizar aquele que se revele mais vantajoso face aos critérios estabelecidos.

2.5. Definições e Terminologia

2.5.1. Definições

Dentro das linhas de fabrico distinguem-se duas classes principais: as linhas de transferência e as linhas manuais.

2.5.1.1.Linhas de transferência

Linhas definidas como uma série de ferramentas automáticas de fabrico ligadas através de dispositivos de transferência de materiais [Wild, 72].

A transferência automática de materiais ou produtos, e os tempos de ciclo de trabalho automáticos das várias máquinas da linha, são a principal característica deste tipo de linhas.

2.5.1.2.Linhas manuais ou linhas de montagem

Caracterizadas por utilizarem trabalho manual, para a transferência de itens ou materiais ao longo da linha, para desenvolverem o trabalho necessário nos itens ou materiais, ou para ambos os efeitos simultaneamente.

Cada um dos tipos de linhas pode ser utilizado para o fabrico de um ou mais produtos, que no entanto devem ter características de fabrico semelhantes. Identificam-se então três variedades de linhas:

2.5.1.3.Linhas de modelo único

Linhas dedicadas à produção de um tipo, ou modelo, de produto.

2.5.1.4.Linhas multi-modelo

Utilizadas na produção, em lotes, de dois ou mais tipos, de modelos ou versões semelhantes de um produto. Cada modelo é fabricado separadamente num lote. Para lotes de grande dimensão estas linhas assemelham-se a linhas de modelo único. Para lotes pequenos aproximam-se das linhas modelos-mistos.

2.5.1.5.Linhas modelos-mistos

Linhas em que dois ou mais tipos, modelos ou versões semelhantes de um produto são fabricados simultaneamente .

2.5.2.Terminologia

Uma linha de fabrico consiste, essencialmente, numa série de postos de trabalho, constituídos por uma ou mais máquinas ferramenta (linhas de transferência), ou um ou mais trabalhadores (linhas manuais) equipados com as ferramentas necessárias.

A quantidade de trabalho necessária à produção de um item, ou o tempo total de fabrico, é dividida pelos postos de trabalho, de modo que , à medida que o item evolui pela linha vai sendo completado em cada posto.

Um dos objectivos ao projectar uma linha de fabrico é tentar atribuir a mesma quantidade de trabalho a cada posto, ou seja, balancear a linha. Nem sempre é possível que a linha seja perfeitamente balanceada, situação muito frequente na prática, e que implica inevitavelmente pior desempenho.

O tempo necessário para completar o trabalho atribuido a cada posto é designado por tempo de serviço. O tempo disponível em cada posto para realizar o trabalho é o tempo de ciclo.

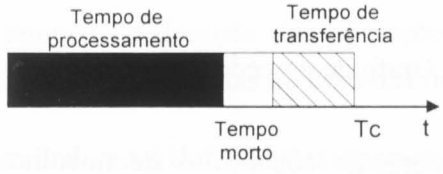


Fig. 2.1 - Componentes do tempo de ciclo

O tempo de ciclo de um posto é o intervalo de tempo entre o completar e o início de trabalho em peças sucessivas, e inclui trabalho produtivo e não produtivo, como tempos mortos. Trabalho não produtivo inclui a transferência de itens entre postos, e no caso das linhas manuais inclui ainda um certo tempo de manuseamento e movimento dos materiais.

O desempenho das linhas de fabrico pode ser avaliado por:

- taxa de produção, inverso do tempo de ciclo;
- eficiência, tempo útil em que a linha está funcionar;
- custo por item produzido, que deverá incluir o custo de matérias primas, de operação de linha, e utilização de ferramentas.

Groover em [Groover, 87] indica o modo de quantificar estas grandezas.

O modo como o trabalho pode ser distribuído pelos postos é influenciado por algumas restrições. As várias operações que constituem o fabrico de um item têm restrições tecnológicas e de precedência que não podem ser postas de parte, porque limitam a livre atribuição de operações aos postos de trabalho. Essas restrições podem ser representadas por diagramas de precedência em que os nós representam as operações, e estão ligados através de setas que indicam a ordem em que elas devem ser realizadas. Um exemplo de um diagrama deste tipo está ilustrado na Fig. 2.2.

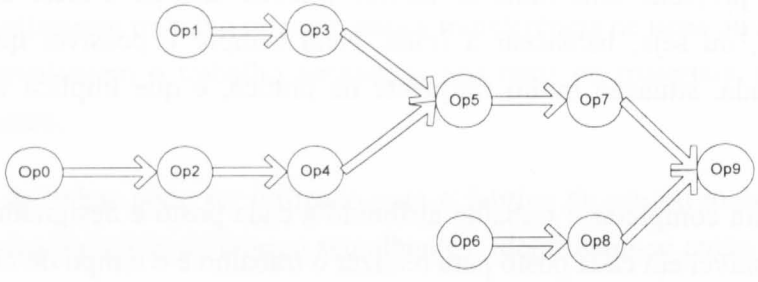


Fig. 2.2 - Grafo de precedências de operações

Por outro lado a atribuição de operações aos postos de trabalho está também limitada por restrições de vizinhança. Ou seja, certas operações podem ter restrição de vizinhança negativa quando o equipamento de que necessitam interfere um com o outro, não sendo por isso aconselhável que se realizem no mesmo posto de trabalho, enquanto que, uma restrição de vizinhança positiva surge, por exemplo, quando duas operações necessitam de um equipamento caro e que por isso mesmo tem de ser partilhado pelas duas operações num só posto de trabalho.

Devido a restrições várias é normalmente difícil atingir balanceamentos perfeitos, surgindo por isso perdas de balanceamento inevitáveis, que servem também como medida da ineficiência da linha.

A percentagem de perdas de balanceamento para um dado posto de trabalho é a diferença entre o tempo de ciclo e o tempo de serviço, expressa como percentagem do tempo de ciclo. Do mesmo modo, a perda de balanceamento para um dado item é dada pela diferença do tempo total disponível (soma dos tempos de ciclo) e o tempo total necessário (soma dos tempos de serviço), expressa como percentagem do tempo total disponível.

Ao contrário das linhas de transferência, em que as operações são realizadas de modo automático, nas linhas manuais o tempo de serviço é variável. Tal factor introduz bastante complexidade no projecto das linhas manuais, sendo muito difícil conseguir balanceamentos sem perdas.

Stocks entre os postos de trabalho são um dos meios para tentar atenuar as irregularidades resultantes da variabilidade dos tempos de serviço. No projecto da linha, uma das decisões a ter em conta será a capacidade dos *buffers*, ou seja, a quantidade máxima de itens em curso de fabrico permitidos entre os postos.

Nas linhas multi-modelo e modelos-mistos, há que tomar também decisões a nível de sequenciamento. No caso das linhas multi-modelo trata-se de sequenciar os lotes a fabricar, enquanto nas linhas modelos-mistos trata-se do sequenciamento dos modelos.

2.6. Projecto de linhas modelo único

Este tipo de linhas é dividido em dois grandes grupos:

- linhas simples: tempos de duração das operações e os tempos de serviço são constantes, condições válidas apenas no caso das linhas de transferência.
- linhas complexas: em que a duração das operações pode variar, caso das linhas manuais.

Algumas das considerações necessárias ao projecto das linhas simples são, no entanto, também relevantes no caso de linhas complexas.

Para cada tipo de linhas abordam-se em seguida os principais problemas a resolver e alguns dos métodos mais utilizados no seu projecto.

2.6.1.Linhas simples

O objectivo do balanceamento de linhas de fabrico é atribuir as operações, que constituem os vários passos do fabrico de um produto, a postos de trabalho, de modo a obter-se a taxa de produção pretendida ao mínimo custo [Wild, 72].

As duas abordagens fundamentais ao problema do balanceamento de linhas são:

- dado o tempo de ciclo, ou seja, a taxa de produção pretendida, atribuir as operações aos postos de trabalho, de modo a minimizar as perdas de balanceamento totais para a linha, e distribuir as perdas inevitáveis, o mais equilibradamente possível pelos postos de trabalho.
- dado o número pretendido de postos de trabalho, atribuir as operações aos postos de trabalho de modo a minimizar as perdas de balanceamento e distribuir as perdas de balanceamento, inevitáveis, o mais equilibradamente possível pelos postos.

Nem sempre é possível obter um balanceamento das linhas sem perdas, pois existem vários factores que o podem impedir, além da própria natureza da relação entre a quantidade de trabalho e o tempo de ciclo, uma vez que, mesmo que a duração total de fabrico de um produto seja divisível pelo tempo de ciclo, as durações das operações e restrições de precedência entre elas podem não permitir o seu agrupamento em parcelas de duração igual ao tempo de ciclo.

Ou seja, conseguir um balanceamento perfeito, como o da Fig. 2.3, depende não só da relação entre a duração das operações e o tempo de ciclo, mas também de outros factores.

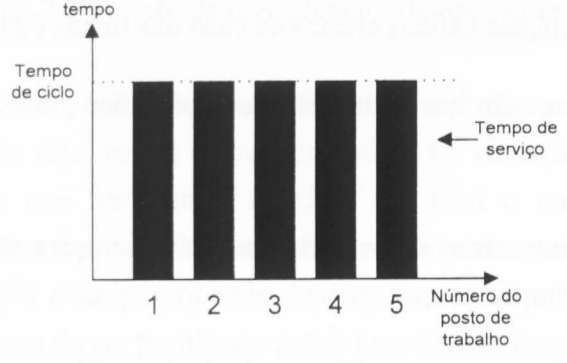


Fig.2.3 - Balanceamento sem perdas

Situações como as das Fig. 2.4 e Fig. 2.5 são mais frequentes na prática. Na Fig. 2.4 ilustra-se uma situação em que quatro dos cinco postos de trabalho apresentam perdas de balanceamento, enquanto que na Fig. 2.5 se demonstra uma situação pior em que todos os postos apresentam perdas de balanceamento.

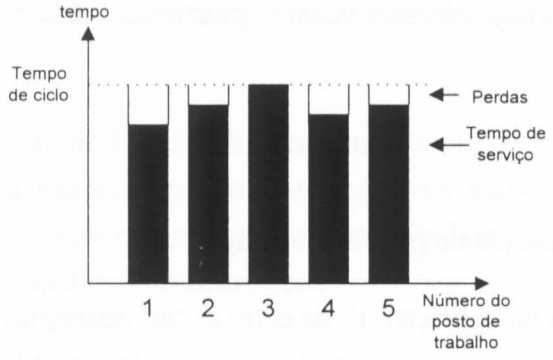


Fig. 2.4 - Balanceamento com perdas

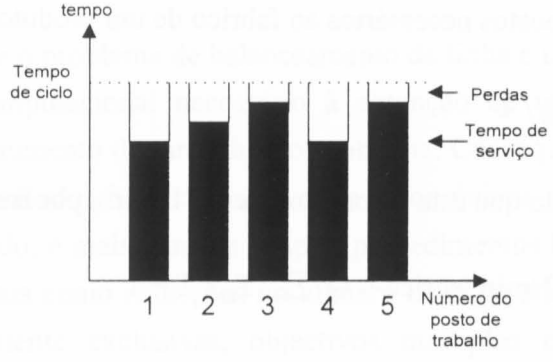


Fig. 2.5 - Balanceamento com perdas em todos os postos

No caso da Fig. 2.5, é possível a argumentação de que se podem diminuir as perdas de balanceamento reduzindo o tempo de ciclo. No entanto, pode ser necessário balancear a linha para o tempo de ciclo especificado.

Alguns dos factores que afectam o balanceamento das linhas derivam da variabilidade inerente ao comportamento humano, factor a considerar no caso das linhas manuais, e que irá ser abordado mais à frente na análise das linhas complexas.

A considerar em qualquer tipo de linhas são as características das várias operações que compõem o fabrico do produto e o trabalho não produtivo, onde se inclui o tempo de manuseamento do produto e ferramentas.

A dificuldade em atingir um bom balanceamento depende da liberdade em atribuir operações a postos de trabalho. Factores que limitam essa liberdade são as restrições de precedência e vizinhança entre as operações, e a própria duração das operações.

O tempo de ciclo é estabelecido normalmente pelos requisitos de saída da linha, isto é, o tempo de ciclo Tc é dado por:

$$T_c = T/Q \qquad (2.1)$$

em que Q é a taxa de saída pretendida no período de tempo T.

Se T_{Ei} for o tempo de realização da operação 'i', de entre as 'm' operações necessários ao fabrico do produto, a quantidade total de trabalho para realizar esse produto será:

$$\sum_{i=1} T_{Ei} \qquad (2.2)$$

O número mínimo, teórico, de postos necessários ao fabrico de um produto é dado por:

$$N_{min} = Q^* \sum_{i=1} T_{Ei} / T \qquad (2.3)$$

No entanto há que ter em atenção que este valor tem que ser inteiro, por isso:

$$Q^* \sum_{i=1} T_{Ei} / T \leq N\text{min teórico} < Q^* \sum_{i=1} T_{Ei} / T + 1 \qquad (2.4)$$

Por outro lado, e mais importante, é que a duração das operações e as restrições na sua atribuição aos postos afectam também o número mínimo possível de postos de trabalho. Por exemplo, o número de postos necessários será afectado pelo número de operações com duração igual ou superior a metade do tempo de ciclo.

O tempo de serviço T_{Sj} é o tempo de que o posto 'j' necessita para trabalhar cada unidade. Por isso $Tc \geq Ts1, Ts2, ..., TsN$.

O tempo médio de serviço é:

$$T_{S\,med} = \sum_{j=1} T_{Sj} / N = \sum_{i=1} T_{Ei} / N \qquad (2.5)$$

O atraso de balanceamento para a linha é dado por:

$$N^*T_c - \sum_{j=1} T_{Sj} \qquad (2.6)$$

E as perdas de balanceamento para a linha são:

$$L = (T_C - T_{S\,med})/T_C * 100\% \qquad (2.7)$$

O objectivo da abordagem de minimização do número de postos para um dado tempo de ciclo é, portanto, minimizar L.

O problema do balanceamento de linhas é um problema complexo e importante. Desde os anos 50 que têm surgido vários métodos para o tentar resolver, cada um dos quais com as suas vantagens e desvantagens. Esses métodos podem ser divididos em duas grandes categorias: procedimentos óptimos e procedimentos heurísticos.

Procedimentos óptimos incluem três grupos principais: o primeiro inclui métodos baseados em programação inteira, o segundo algoritmos *branch-and-bound*, e o terceiro consiste em procedimentos de procura em árvore. Em [Talbot, 84], [Held, 62], e em [Bowman, 59], são descritos procedimentos deste tipo.

No entanto, verifica-se que o problema de balanceamento de linha é um problema NP-difícil. Tal implica que o tempo computacional necessário à obtenção de uma solução óptima cresce exponencialmente com o aumento do tamanho do problema. Consequentemente, para problemas de grande dimensão, os métodos heurísticos revelam-se os únicos capazes de obter na prática uma solução. Por outro lado, é mais simples adaptar procedimentos heurísticos para suportarem características especiais, tais como restrições no número de componentes a ser tratado em cada posto, operações mutuamente exclusivas, objectivos múltiplos ou durações de operações variáveis.

Os métodos heurísticos podem ser facilmente criticados, uma vez que não há segurança em se encontrarem as melhores soluções para cada caso. No entanto, o seu desempenho poderá ser validado na prática recorrendo à simulação, o que permite, regra geral, verificar a vantagem da sua utilização.

2.6.1.1.Heurísticas para balanceamento de linhas dado o tempo de ciclo

De seguida são apresentados alguns procedimentos heurísticos com objectivo de fazer uma análise comparativa. Em [Wild, 72], [Groover, 87] e [Boctor, 95] podem encontrar-se exemplos práticos da sua aplicação, bem como a apresentação de mais algumas heurísticas deste tipo e de resultados que comprovam as vantagens da sua utilização.

2.6.1.1.1.Método dos pesos posicionais

Método desenvolvido por Helgeson e Birnie no início dos anos 60. Trata-se de um método rápido mas aproximado que, no entanto, permite atingir boas soluções mais rapidamente do que métodos alternativos. Um dos estudos comparativos foi realizado por Boctor em [Boctor, 95], e permite de facto avaliar o seu bom desempenho.

É possível incluir neste método restrições de precedência e vizinhança.

Para cada operação, que faz parte do grafo de operações necessárias ao fabrico do produto, é calculado o seu peso posicional, que consiste na soma da sua duração com as durações de todas as operações que se lhe seguem. O peso posicional é, portanto, uma medida do tamanho da operação e da sua posição na sequência de operações. As operações, respectivas durações e os seus antecessores imediatos, são organizados numa tabela por ordem decrescente de peso posicional. Em seguida é analisada a tabela e as operações são sucessivamente atribuídas aos postos de trabalho por ordem decrescente do seu peso posicional e de modo a não se violar nenhuma restrição de precedência.

2.6.1.1.2.Regra do maior candidato

Recorrendo a esta técnica as operações são atribuídas aos postos seleccionando de entre as operações exequíveis, operações cujas antecedentes já foram realizadas, a de maior duração.

Trata-se de uma heurística muito simples que permite obter resultados mais rapidamente que o método dos pesos posicionais para problemas de pequena dimensão. No entanto, em problemas de maior complexidade o método dos pesos posicionais permite obter melhores balanceamentos.

2.6.1.1.3.Comsoal

Método de balanceamento de linhas designado por Comsoal (método computorizado de sequenciamento de operações para linhas de montagem), desenvolvido por volta do ano de 1965. Esta técnica requer a utilização de um computador para amostragem de dados e simulação de balanceamentos possíveis.

Consiste na construção de uma lista, a lista A, que numa coluna apresenta as operações e noutra o total de operações que a antecedem imediatamente no diagrama de precedências. Em seguida constrói-se uma lista, a lista B, que contém todas as operações que não têm antecessores

imediatos (elementos da lista A com um zero na segunda coluna). Selecciona-se aleatoriamente um elemento da lista B, removendo-o, em seguida remove-se também esse elemento da lista A e faz-se a sua actualização. Adicionam-se, em seguida, à lista B os elementos que são sucessores imediatos do elemento seleccionado e que já não têm antecessores imediatos (já todos os seus restantes antecessores imediatos foram seleccionados).

Este procedimento é repetido até se construir uma sequência que contenha todos as operações. As operações são sucessivamente atribuídas, de acordo com a ordem com que foram seleccionadas, aos postos de trabalho 1, 2, 3, etc..., sendo o tempo de ciclo de cada posto diminuído até que não seja possível acomodar mais nenhuma operação, altura em que se começam a atribuir operações ao posto seguinte.

O número de postos do balanceamento é contado e comparado com o melhor balanceamento anterior. Se houver melhoria, o novo balanceamento é armazenado em computador e o anterior é apagado. Deste modo, gerando um conjunto vasto de soluções possíveis, poderá obter-se um bom balanceamento da linha.

2.6.1.1.4.Heurística da Multi-Regra

Boctor em [Boctor, 95] apresenta uma heurística baseada em várias regras e faz um estudo comparativo com outras heurísticas, como as já apresentadas anteriormente, e que permite verificar a mais valia que poderá ser obtida recorrendo à sua utilização.

Os passos a seguir, enquanto existem operações que ainda não foram atribuídas a nenhum posto, são os seguintes:

- Passo 1: estabelecer a lista das operações escalonáveis (candidatas);
- Passo 2: se a lista está vazia, adicionar novo posto de trabalho e voltar ao Passo 1, senão seguir para o Passo3;
- Passo 3: atribuir a tarefa escalonável com maior prioridade ao posto de trabalho.

Neste procedimento, uma operação candidata é uma operação em que todos os antecessores já foram atribuídos a algum posto e cuja duração não é maior do que tempo que resta disponível no posto de trabalho actual.

Antes de descrever a forma como são determinadas as prioridades de cada operação, é necessário introduzir algumas definições.

Em primeiro lugar, uma "operação severa" é uma operação com tempo de processamento superior ou igual a metade do tempo de ciclo. Em segundo lugar, uma operação é "candidata subsequente da operação I" se passa a escalonável depois de atribuída a operação "I" ao posto actual.

A escolha da operação a atribuir ao posto é feita, seleccionando de entre as operações escalonáveis, uma operação de acordo com o seguinte procedimento:

- a operação com duração igual ao tempo que falta atribuir ao posto. Se não houver uma operação nessas condições, usar a próxima regra. Para ultrapassar "empates" atribuir a operação com o maior número de "candidatas subsequentes";
- a "operação severa" com maior número de "candidatas subsequentes". Se não há nenhuma tarefa "severa", usar regra seguinte. Em caso de empate, escolher a operação com maior tempo de processamento;
- a combinação de duas operações com duração igual ao tempo que falta ocupar no posto de trabalho corrente. Se não há nenhuma combinação que satisfaça este requisito, passar à regra seguinte. Em caso de empate, utilizar o maior número de "candidatas subsequentes";
- a operação com maior número de "candidatas subsequentes". Para ultrapassar empates seleccionar a operação com maior número de sucessores imediatos "severos", e se o empate persistir, atribuir a operação com maior tempo de processamento.

2.6.1.1.5.Estudos comparativos

Para avaliar o desempenho da Heurística Multi-Regra, Boctor realizou um estudo comparativo, [Boctor, 95] com outros quinze procedimentos heurísticos, baseado em 67 problemas retirados da literatura e 700 problemas gerados aleatoriamente.

Boctor no seu estudo avaliou a possibilidade de utilizar como critério a percentagem da média de tempo morto, ou a percentagem do aumento médio acima do mínimo (óptimo) número de postos. No entanto, estes critérios podem ter algumas desvantagens acentuadas. Por exemplo: se o número óptimo de postos é relativamente pequeno os métodos capazes de obter melhores resultados em problemas de maior escala serão penalizados, ao passo que os métodos com bom desempenho em problemas de pequena dimensão são favorecidos.

Por essa razão, e uma vez que nos problemas avaliados o número mínimo de postos era pequeno (entre 2 e 12), Boctor optou por comparar os diferentes métodos com base no número de vezes em que cada um conseguiu obter a solução óptima.

Do estudo realizado ressalta o bom desempenho da heurística proposta, que apresentou os melhores resultados, bem como o Método dos Pesos Posicionais e a Regra do Maior Candidato.

2.6.1.2.Heurísticas para balanceamento de linhas dado o número de postos de trabalho pretendido

O balanceamento da linha para um dado número de postos de trabalho envolve, normalmente a minimização do tempo de ciclo, o que implica um aumento na taxa produtiva e diminuição das perdas de balanceamento

Embora não frequentes, existem certas situações em que torna-se necessário projectar uma linha de modo a utilizar um dado número de postos. Tal acontece quando, por exemplo, uma linha de montagem se destina ao fabrico de vários produtos. Neste caso, quando se pretende fabricar um novo produto, o número de postos já está fixo, e as operações têm que lhes ser atribuídas .

Tal situação pode ocorrer também em linhas multi-modelo. Se um novo lote de produtos tem de ser fabricado, pode não ser possível ou justificável rearranjar a linha, e consequentemente, todos os postos de trabalho terão de ser ocupados com a produção do novo produto.

Neste tipo de problemas, o tempo de ciclo é determinado pelo máximo tempo de serviço, max T_{Sj} (j = 1, 2, ..., N). O objectivo do balanceamento da linha é a minimização das perdas totais de balanceamento:

$$L = (N*T_C - \sum_{i=1} T_{Ei}) / N*T_C *100\% =$$

$$= (N*(\max T_{Sj}) - \sum_{i=1} T_{Ei}) / N*(\max T_{Sj})*100\% \qquad (2.8)$$

A resolução deste tipo de problemas recorre ao mesmo tipo de heurísticas de resolução do problema de minimização do número de postos de trabalho para um dado tempo de ciclo. O procedimento é normalmente o seguinte:

- Calcular o tempo de ciclo mínimo necessário para o fabrico do produto pretendido e para o número de postos especificado, ou seja: $T_{C,\,min} = \sum_{i=1} T_{Ei} / N$. Este será o tempo de ciclo que se obtém no caso de ser possível realizar um balanceamento perfeito.

- ▷ Tentar obter um balanceamento com N postos de trabalho para o tempo de ciclo determinado anteriormente.
- ▷ Se não foi possível obter um balanceamento com N postos, aumentar o tempo de ciclo e tentar de novo obter um balanceamento com N postos.
- ▷ Continuar a aumentar o tempo de ciclo, em incrementos relativamente grandes, até se obter um balanceamento com N postos.
- ▷ Em seguida, reduzir o tempo de ciclo em pequenos incrementos até se atingir o menor tempo de ciclo possível a uma linha com N postos.

Poderá recorrer-se também a um método de certo modo inverso do anterior, em que se estabelece à partida um tempo de ciclo para o qual seja possível obter um balanceamento com N postos de trabalho, e em seguida diminui-se esse tempo de ciclo para obter o melhor balanceamento possível.

Um estudo comparativo de utilização de várias heurísticas na resolução deste tipo de problemas, foi realizado por Mastor[Mastor, 70].

Estudo esse que efectuou a comparação de dez métodos de balanceamento de linhas, e que incluiu um dos métodos propostos por Arcus, neste caso a Regra IX, um método de programação dinâmica proposto por Held, Karp e Sharesian, e regras heurísticas mais simples como a Regra do Maior Candidato, a Regra do Número de Sucessores Imediatos, e ainda um método aleatório, entre outros.

2.6.1.3.Alternativas de auxílio ao balanceamento de linhas

Existem alguns aspectos que, embora não substituam a obtenção de um bom balanceamento da linha, podem facilitar e melhorar significativamente a produtividade das linhas de fabrico.

Um dos aspectos a investigar será melhorar o método de trabalho, por exemplo em termos de optimizar o manuseamento de ferramentas, posicionar adequadamente as peças em fabrico, e dispor de ferramentas extra ou auxiliares.

Outro campo de actuação será a alteração das velocidades das máquinas, mais significativo no caso de linhas de transferência. Poderá ser possível reduzir a duração das operações aumentando as velocidades das máquinas ou ferramentas. No entanto, uma hipótese também a ser explorada

poderá ser a redução da velocidade como utilização do tempo morto, o que permite, por outro lado, aumentar o tempo de duração das ferramentas.

Um dos factores que poderá ser utilizado para melhorar o balanceamento de uma linha manual, é a distribuição dos trabalhadores de acordo com as suas aptidões e níveis de desempenho que conseguem obter na realização das operações. Nomeadamente, colocando os operadores com os melhores desempenhos em postos gargalo. De modo a identificar os desempenhos dos vários operadores na realização das diferentes tarefas, é usual o recurso a técnicas de "métodos e tempos" ou monitorização do trabalho. A este nível, é necessário ter em atenção que o desempenho dos operadores depende inevitavelmente das suas condições físicas, psicológicas e das suas aptidões técnicas.

Em algumas ocasiões pode ser possível, e benéfico, retirar itens que se encontram em *stock*, à espera de ser processados num posto gargalo, para serem completados numa linha separada.

Nas linhas manuais a movimentação de operadores, que se encontram com menos sobrecarga de trabalho para auxílio em postos gargalo, pode contribuir para diminuir as perdas de balanceamento da linha. Por outro lado, operadores em postos com tempo de serviço reduzido podem ser colocados em mais do que um posto, ou mesmo linha. No entanto, tal não é possível a não ser que possam existir *stocks* entre os postos.

A soma das durações das operações atribuídas a um posto poderá exceder o tempo de ciclo, sendo para tal necessário que:

- o posto seja duplicado;
- se realize trabalho extra, por exemplo mais um turno;
- se atribua mais do que um operador a esse posto.

A avaliação da vantagem de permitir que situações destas ocorram é bastante subjectiva, por isso terá de ser motivo de uma investigação cuidadosa por parte dos projectistas da linha.

2.6.1.4.Localização de postos de inspecção de qualidade

A inspecção dos materiais e dos itens ao longo do seu fabrico é indispensável para um bom controlo de qualidade. A questão que se coloca é saber qual a melhor localização para realizar inspecção.

Numa linha de fabrico, a inspecção pode ocorrer num posto, ou mais frequentemente depois de um posto de trabalho. Poderá mesmo ser considerada parte do trabalho não produtivo de uma tarefa. Por outro lado, postos de inspecção podem ser consideradas postos de trabalho e integrados na linha para balanceamento de acordo com o tempo de ciclo pretendido.

Postos de inspecção poderão ser, à partida, colocados no diagrama de precedências sendo atribuídos aos postos tal como as restantes operações. No entanto, normalmente a localização dos postos de inspecção é determinada depois de efectuado o balanceamento da linha sendo a sua localização influenciada por considerações como o custo de inspecção e o custos de peças defeituosas.

Na prática, as decisões a nível de localização dos postos de inspecção são baseadas em regras de índole empírica e qualitativa. Tal pode implicar a sua localização em:

- Antes de uma operação de custo elevado, para evitar processamento de alto custo em itens com defeito;
- Antes de um conjunto de operações durante o qual a inspecção é difícil, ou mesmo impossível, de realizar;
- Depois de operação com elevada taxa de produção de itens defeituosos;
- Antes de pontos de mudança de responsabilidades em relação à qualidade, como por exemplo, entre secções ou grupos.

2.6.2.Linhas complexas

A diferença fundamental entre as linhas manuais e as linhas de transferência é o facto de nas primeiras a duração das operações não ser constante ao longo do período de operação da linha.

A variabilidade é uma característica do trabalho humano, por isso não é razoável assumir que os tempos de serviço e duração das operações são constantes. Por um lado, o método de trabalho varia de pessoa para pessoa, e por outro lado ao longo de um certo período de tempo existem variações no trabalho realizado pela mesma pessoa.

Mesmo que um operário recorra constantemente ao mesmo método de trabalho, factores como falta de materiais, itens defeituosos, erros no desempenho, bem como fadiga, distracções e interrupções afectam o tempo necessário à realização de determinada tarefa. Se a estes factores se

juntar a possibilidade de deliberadamente ou não o método de trabalho ser alterado, torna-se claro que para qualquer trabalhador e para a realização de qualquer tarefa o tempo necessário pode variar.

A pouca variabilidade nos tempos de serviço e duração das operações facilita consideravelmente o projecto de linhas de transferência, uma vez que o conceito de balanceamento da linha é viável. No caso das linhas manuais, a variabilidade dos tempos faz com que o projecto deste tipo de linhas seja muito mais complexo, sendo praticamente impossível conseguir balancear a linha. Pode obter-se um balanceamento baseado nos tempos *standard* de duração das operações, ou mesmo nos seus valores médios. No entanto, tal não assegura que a linha opere sempre de modo balanceado uma vez que ao longo do seu período de funcionamento os tempos acabam por variar.

A importância da variabilidade dos tempos para o projecto e operação das linhas de fabrico manuais torna necessária a avaliação de quais os factores que mais a influenciam e em que medida.

2.6.2.1.Variabilidade do operador

Ao longo do período de trabalho verifica-se que o operador não apresenta um ritmo de trabalho sempre constante, verificando-se [Wild, 72] que no início do período a taxa de produção é baixa, aumentando em seguida, para voltar a descer perto do fim do período de trabalho.

Se se medirem os tempos efectuados por cada operador, nomeadamente através de monitorização automática ou recorrendo a agentes de métodos e tempos, é possível verificar que entre os períodos de trabalho, perde-se alguma da performance atingida anteriormente, pelo que o rendimento inicial atingido num determinado período de tempo vai ser inferior ao rendimento final do período de trabalho anterior. Tal pode verificar-se, ainda que em menor escala, em paragens que ocorram ao longo do dia, por exemplo nos intervalos para almoço e lanche.

A capacidade e predisposição à aprendizagem, bem como o treino dos operadores, são factores que também influenciam a variabilidade dos tempos ou rendimentos obtidos ao longo do período de fabrico de determinado produto, e que distinguem os operadores entre si. Operadores com facilidade de aprendizagem são mais flexíveis, e por isso, mais indicados para a realização de novos tipos de operações que surjam no caso do fabrico de um diferente produto. Enquanto que, a um operador pouco flexível mais muito bem treinado na realização de um determinado tipo de operação, é conveniente atribuir operações semelhantes às que está habituado a realizar.

Neste tipo de linhas a troca frequente de mão de obra, provocada por exemplo por absentismo, troca de turnos, ou mesmo operadores que se despeçam, é indesejável, pois tal obrigaria a constantes períodos de treino e aprendizagem que comprometem os rendimentos, e que provocam a diminuição da taxa produtiva. Sendo de ter em atenção que a substituição de um operador numa linha ainda em fase de aprendizagem acarreta menores custos do que a substituição de um operador numa linha já muito treinada e competente.

As curvas de aprendizagem, curvas que representam o aumento no desempenho ao longo das várias vezes em que a mesma tarefa é realizada, são extremamente importantes, não só na determinação da duração óptima da tarefa, mas também no que diz respeito a:

- Treino: projecto de programas de treino, medida e avaliação do treino.
- Planeamento da Produção: por exemplo, deve ter-se em atenção que existe um período inicial, de aprendizagem, em que a taxa de saída é mais baixa, antes de se atingir a máxima performance.
- Medida da duração do trabalho: ao estabelecer os tempos de duração *standard* das operações, nomeadamente recorrendo a técnicas de monitorização automática, deve ter-se em atenção o efeito da aprendizagem.

A aprendizagem é influenciada por vários factores, alguns dos quais são:

- Duração da tarefa;
- Complexidade da tarefa;
- Capacidades e habilidades do operador;
- Semelhança entre as tarefas já realizadas e as tarefas a realizar;
- Motivação e características particulares do operador;

Todos estes factores são afectados pelas condições físicas e psíquicas dos indivíduos.

A variabilidade dos tempos de serviço atingidos pelos operadores é grandemente afectada pela condição física do indivíduo, que em caso de doença obviamente não atingirá os melhores rendimentos, tal como em situações de problemas familiares, cansaço, e distracções que surjem ao longo do dia no próprio local de trabalho.

O ambiente de trabalho com colegas e superiores, tal como todas as suas características de personalidade, são também factores que influenciam os rendimentos que os operadores conseguem atingir e as suas aptidões e motivações de trabalho.

Toda esta complexidade referente ao comportamento humano dificulta o projecto e balanceamento das linhas manuais.

2.6.2.2.Tipos de linhas manuais

A complexidade das linhas manuais resulta, tal como abordado anteriormente, das características de variabilidade dos tempos de serviço, mas também da diversidade de métodos de operação que podem apresentar.

Antes de abordar o projecto de linhas manuais torna-se necessário ter em atenção esses diferentes métodos de operação. Apresenta-se em seguida a classificação de Ray Wild, em [Wild, 72], cujo objectivo foi o de identificar os tipos básicos de linhas manuais.

Distinguem-se em primeiro lugar dois tipos básicos de linhas manuais:

- Linhas não mecânicas: linhas que não recorrem a nenhum tipo de tapete rolante ou qualquer outro dispositivo mecânico para a deslocação de itens entre postos de trabalho.

- Linhas com tapete rolante: utilizam um tapete rolante, ou outro dispositivo mecânico que transfere os itens ao longo da linha ou entre os várias postos de trabalho.

Dentro das linhas com dispositivo rolante existem as linhas em que os itens são removidos do dispositivo rolante e as linhas em que os itens estão fixos ao dispositivo rolante, podendo, neste último caso, estar disponível mais do que um, ou apenas um item em cada posto.

2.6.2.2.1.Linhas não mecânicas

Se cada posto de trabalho da linha puder reter os itens até que o seu processamento nesse posto tenho sido completado passando-os nessa altura ao posto seguinte, existe uma situação de tempo de ciclo variável, sendo o fluxo de trabalho irregular ao longo da linha, e em que não são produzidos itens incompletos. Se for este o método de funcionamento da linha, não existem

tempos mortos, uma vez que o tempo de ciclo será sempre igual ao tempo de serviço. Na prática, não é normalmente possível que as linhas operem deste modo, devido à dependência entre os postos. Enquanto existe a possibilidade de evitar itens incompletos, é possível que surjam tempos mortos devidos a:

- um posto com falta de trabalho, o que acontece quando esse posto passou o item produzido ao posto seguinte e ainda não recebeu outro item do posto que o antecede;

- um posto encontra-se bloqueado pelo posto seguinte, o que surge quando o posto já terminou o processamento de determinado item e não o pode passar ao posto seguinte por este se encontrar ocupado.

Para reduzir a probabilidade de os postos pararem por falta de trabalho ou por bloquearem pode recorrer-se a pequenos armazéns de itens (*buffers*) entre eles.

2.6.2.2.2.Linhas com dispositivo rolante

Dentro deste tipo de linhas é feita a distinção entre linhas em que as peças a produzir são removidas do dispositivo rolante e aquelas em que as peças se mantêm fixas ao dispositivo rolante.

2.6.2.2.2.1.Itens removidos da linha

Linhas em que os trabalhadores de cada posto removem um item do dispositivo rolante para realizarem o seu trabalho, colocando-o de novo no dispositivo rolante quando o processamento é concluído e antes de retirarem o próximo item.

Os problemas que podem surgir neste tipo de linhas são:

- Tempos mortos ou sub-utilização dos postos podem ocorrer se, ao terminar o processamento de um item, o item seguinte não está disponível, ou seja pode ocorrer falta de trabalho nos postos. O bloqueio de postos não acontece devido ao contínuo movimento do dispositivo rolante e :

- Itens podem passar por um posto sem lá serem processados. É possível que sejam produzidos itens incompletos, pois se o processamento num dado posto demorar

mais que o habitual, o dispositivo rolante, que continua em funcionamento, acaba por transportar o (s) item(s) seguinte(s) para o posto seguinte.

A taxa de alimentação do primeiro posto é constante, no entanto nos postos seguintes tende a ser irregular e dependente dos tempos de serviço dos postos anteriores. O fluxo de trabalho é irregular, e o tempo de ciclo variável, não existindo, pelo menos teoricamente, limite máximo.

Podem ser introduzidos armazéns intermédios de itens em curso de fabrico, se for possível aos operadores que se encontram nos postos de trabalho retirarem os itens do dispositivo rolante colocando-os no armazém enquanto não é possível iniciar o seu processamento. De qualquer modo, neste tipo de linhas, o bloqueio de postos não acontece, pois mesmo que o armazém entre esse posto e o seguinte esteja completamente cheio é sempre possível colocar os itens no dispositivo rolante.

Neste tipo de linhas o tempo de tolerância é um conceito importante. Trata-se do período de tempo em que um item está disponível para ser retirado da linha, e é determinado pela velocidade do dispositivo rolante e comprimento do posto em que passa.

2.6.2.2.2.Itens fixos à linha

Por vezes devido ao seu peso, ou outras características, não é possível retirar os itens do dispositivo de transporte rolante. Neste tipo de linhas o trabalho tem de ser realizado em cada posto enquanto o item está em movimento, o que requer que os operadores subam e desçam da linha ou se desloquem ao longo dela para efectuarem o trabalho, podendo ou não existir sobreposição de postos de trabalho.

Possibilidade de sobreposição de postos de trabalho

É possível que exista alguma sobreposição de postos de trabalho, sendo a extensão da sobreposição determinada pelo espaçamento e movimento permitido aos trabalhadores.

Neste tipo de linhas o fluxo de trabalho é regular, e o tempo de ciclo variável. O tempo de ciclo está limitado por um valor máximo que depende do movimento permitido aos trabalhadores em cada direcção. É possível que surjam itens incompletos devido aos tempos de ciclo limitados. Também podem ocorrer tempos mortos por falta de trabalho no posto, mas não é possível que surjam postos bloqueados nem é possível introduzir armazéns intermédios de itens em curso de fabrico.

Sem sobreposição de postos de trabalho:

Linhas em que mais do que um item está disponível para cada posto

Apresentam características semelhantes às linhas em que os itens estão fixos e existe sobreposição de postos.

O tempo de ciclo é variável e limitado por um valor máximo que depende do comprimento do posto, velocidade do dispositivo rolante e espaçamento entre os itens. O fluxo de trabalho é regular e a taxa de alimentação constante. É possível que surjam itens incompletos, devido ao limite máximo do tempo de ciclo. Pode surgir tempo morto por falta de trabalho num posto, mas o bloqueio de postos não é possível, tal como não é possível introduzir armazéns intermédios.

Linhas em que apenas um item está disponível em cada posto

Neste tipo de linha o tempo de ciclo é fixo e determinado pelo comprimento do posto e taxa de alimentação (velocidade da linha e espaçamento dos itens). O fluxo de trabalho é regular e a taxa de alimentação é fixa. É possível que sejam produzidos itens incompletos devido ao tempo de ciclo ser limitado. Podem surgir tempos mortos, mas por motivos que diferem dos da linha anterior. Neste caso independentemente do tempo de processamento no posto (tempo de serviço) os itens permanecem lá durante um certo período de tempo (tempo de ciclo).

É raro encontrar este tipo de linha na prática. No entanto as suas características são idênticas às de uma linha sem dispositivo rolante mas cujo tempo de ciclo em cada posto seja limitado. Nesse caso é usual o recurso a alarmes ou sinais luminosos para indicar aos operadores quando devem passar os itens ao posto seguinte.

Os diferentes tipos de linhas manuais apresentados anteriormente, são tipos básicos que podem ser implementados na prática com ligeiras diferenças. Se a isto se juntar a possibilidade de variações no método de trabalho, como por exemplo a situação de um operador ser responsável por mais do que um posto, verifica-se que de facto são muitas as alternativas e grande a complexidade inerente ao projecto de uma linha manual.

2.6.2.3.Projecto de linhas manuais

No projecto de linhas os pontos seguintes têm de ser tidos em consideração:

- ▷ Como se devem atribuir as operações aos postos de trabalho, e qual o tempo de ciclo adequado?
- ▷ Devem ser duplicados alguns postos de trabalho?
- ▷ Qual deve ser o método de funcionamento da linha, e devem ser utilizados armazéns intermédios?
- ▷ Como distribuir os operadores pelos diferentes postos de trabalho?

Apesar de este tipo de linhas funcionar de modo irregular o primeiro objectivo do projecto da linha é o de atribuir operações aos postos de trabalho de modo a minimizar as perdas para a taxa de saída pretendida.

A primeira técnica capaz de lidar com o problema da variabilidade dos tempos de serviço foi desenvolvida por Moodie e Young, [Wild, 72].

Trata-se de uma heurística que consiste em duas fases. Na primeira das quais é aplicada a Regra do Maior Candidato. Assume-se que os tempos de duração das operações são independentes e seguem distribuição normal, com valores médios e variâncias conhecidas.

A minimização das perdas de balanceamento está, neste método, sujeita a uma certa probabilidade de o tempo de serviço do posto exceder o tempo de ciclo.

Na segunda fase são utilizadas várias regras heurísticas para deslocar operações entre os postos, na tentativa de equilibrar, não só os valores médios, mas também as variâncias dos tempos de serviço.

Esta técnica apresenta algumas limitações. Uma delas é o facto de assumir um tempo de ciclo fixo, não podendo ser utilizada directamente para o balanceamento de linhas com um determinado número de postos de trabalho. Por outro lado, o critério de atribuir operações aos postos sujeito a uma certa probabilidade de o tempo de serviço não exceder o tempo de ciclo, levanta o problema de estabelecer qual deve ser essa probabilidade.

Ramsing & Downing [Wild, 72], desenvolveram um programa que usa o Método dos Pesos Posicionais para atribuir operações aos postos de trabalho, de acordo com um dado tempo de ciclo. Depois de obtido um primeiro balanceamento o tempo de ciclo vai sendo decrementado de uma certa quantidade, realizando-se algumas tentativas, e registando-se o número de postos e perdas de balanceamento para cada caso.

O programa permite uma certa flexibilidade na tomada de decisões, e indica qual o melhor balanceamento, de acordo com o critério de minimização das perdas de balanceamento, e a eficiência da linha para diferentes taxas de saída.

O problema de balanceamento de linhas assumindo tempos de serviço independentes e seguindo distribuição normal, foi também estudado por Brennecke [Wild, 72], que abordou os dois tipos de abordagem:

- Dado o tempo de ciclo minimizar o número de postos de trabalho e as perdas de balanceamento;
- Dado o número de postos minimizar o tempo de ciclo e as perdas de balanceamento.

Os procedimentos abordados anteriormente utilizam uma probabilidade do tempo de serviço exceder o tempo de ciclo. A determinação dessa probabilidade requer o conhecimento dos custos associados à produção de itens incompletos e tempos mortos dos postos, e caso existam armazéns intermédios de itens em curso de fabrico, o custo desse armazenamento. A determinação destes custos é difícil, o que vem aumentar ainda mais a complexidade deste tipo de problemas.

Neste contexto surge a simulação como uma ferramenta que possibilita a análise e estudo das características das linhas de fabrico, nomeadamente no que diz respeito à detecção da acumulação de peças entre postos de trabalho, e consequente detecção de estações gargalo, dos tempos de utilização dos postos, e dos dias necessários ao fabrico da totalidade dos produtos, entre outros.

2.7. Estudos de Simulação

O recurso à simulação é no projecto de linhas, essencialmente nas linhas manuais, uma técnica indispensável, dada a complexidade do problema e os vários factores que estão em jogo. A sua aplicação pode ser feita a vários níveis, por exemplo:

- na análise de diferentes balanceamentos para auxílio à decisão de qual a melhor a implementar na prática;

- na avaliação das vantagens de factores como a introdução de armazéns intermédios de itens em curso de fabrico, e da sua capacidade, resultado do compromisso entre a mais valia que introduzem e os custos que acarretam;
- na detecção de possíveis rupturas na linha antes de estas acontecerem na prática, permitindo actuar de modo a evitar o seu aparecimento;
- na determinação de como deve ser sequência do o fabrico de diferentes produtos nas linhas, para que as quebras de produtividade sejam as menores possíveis;
- na avaliação de qual o melhor modo de funcionamento da linha, por exemplo em caso de ser possível a produção de modelos mistos [Ma].

As técnicas de simulação, embora não forneçam resultados rigorosos permitem lidar com problemas cuja grande dimensão e complexidade os impede de serem analisados de modo analítico. No entanto, deve ter-se sempre em atenção que a elaboração de uma análise desse tipo deve ser cuidadosamente planeada e elaborada de modo a que os seus resultados sejam de confiança.

Nesta secção o que se pretende é essencialmente analisar alguns estudos de simulação, e respectivas conclusões, e fornecer campos de actuação no projecto de linhas de fabrico, deixando de lado o modo como a simulação foi ou deveria ser realizada.

2.7.1.Linhas de transferência

A introdução de armazéns intermédios neste tipo de linhas é normalmente evitável, no entanto na prática é frequente a sua utilização como meio de evitar a paragem da linha em caso de avaria temporária do equipamento.

Mesmo o equipamento de melhor qualidade e sujeito a uma cuidada manutenção pode avariar. A introdução de armazéns de itens em curso de fabrico entre os postos de trabalho pode evitar o bloqueio ou paragens de postos por falta de trabalho, no caso de algum equipamento deixar de funcionar temporariamente.

A existência de um armazém de peças a seguir ao posto que deixa de funcionar permitirá que o posto seguinte não seja interrompido, enquanto que a existência de um armazém antes do posto que deixa de funcionar evitará que o posto anterior pare por bloqueio.

Se as falhas de equipamento forem, como se pretende que sejam, pouco frequentes o capital investido em armazéns intermédios pode ser superior ao obtido em caso de parar parte da linha quando da ocorrência de uma avaria. O problema, é portanto o de determinar qual o tamanho óptimo dos armazéns e onde devem ser colocados.

2.7.2.Linhas manuais

Estudos de simulação realizados nos anos 60 permitiram tirar algumas conclusões quanto às características de funcionamento das linhas manuais. Estudos esses referidos em [Wild, 72] e cujas conclusões se irão abordar em seguida.

Verifica-se que a variabilidade dos tempos de serviço tem como efeito a redução da taxa de produção da linha, sendo a redução tanto maior quanto maior o número de postos e quanto mais pequenos os armazéns intermédios. Estas perdas devem-se à possibilidade de bloqueio e falta de trabalho nos postos. Deste modo, quanto maior o número de postos maior é a possibilidade de ocorrência de tempos mortos por falta de trabalho ou bloqueio em postos; enquanto que quanto mais pequenos forem os armazéns de peças entre os postos, menor a protecção contra essas ocorrências.

As principais características deste tipo de linhas podem ser resumidas como:

- A eficiência da linha, medida pela taxa de saída ou pela média de tempos mortos, é função do tamanho da linha, variabilidade dos tempos de serviço, e capacidade dos armazéns intermédios. Mantendo-se os restantes factores, a eficiência da linha diminuiu com o aumento do tamanho da linha, aumento da variabilidade dos tempos de serviço e diminuição da capacidade dos armazéns intermédios.

Por vezes as linhas manuais funcionam sem estarem balanceadas, referindo-se este conceito ao balanceamento das linhas de modo a que os tempos médios de serviço de cada posto sejam idênticos, por impossibilidade de os balancear ou na tentativa de obter melhores produtividades.

Estas situações ocorrem não só no início do seu funcionamento, mas também após paragens, devido por exemplo a avaria de equipamento, e quando há troca do modelo em fabrico.

Da análise de alguns tipos de linhas não balanceadas foram retiradas as seguintes conclusões:

- A taxa de produção de uma linha com dois postos é maximizada pelo balanceamento dos postos.

- A taxa de produção de uma linha com três postos aumenta atribuindo o menor tempo médio de serviço ao posto intermédio.

A análise do tamanho atingido pelos armazéns intermédios permite chegar à conclusão que o seu tamanho máximo é inferior em postos que se encontram no fim da linha do que em postos no início da linha, sendo a diferença, bem como o tamanho atingido, dependente da variabilidade dos tempos de serviço.

As diferenças de tempo morto entre postos ocorre devido ao facto de a chegada de trabalho a cada posto ser dependente dos postos que o antecedem; logo quanto maior for o número de antecedentes, maior é a probabilidade de um posto parar por falta de trabalho. Além disso, o fornecimento de trabalho por parte dos postos antecedentes é também dependente da variabilidade dos tempos de serviço desses postos, sendo que um aumento dessa variabilidade origina um aumento do tempo morto e consequente diminuição da taxa de produção.

A quantidade de peças acumuladas em armazém antes de um posto é função da sua utilização; as filas mais pequenas ocorrem antes de postos com maior tempo morto.

Um dos problemas do projectista de uma linha de fabrico manual é o de distribuir os vários operários, com diferentes capacidades de trabalho, pelos postos. Um facto que pode auxiliar a resolução desse problema são as conclusões referidas no parágrafo anterior que sugerem, para reduzir o tempo morto total, que os postos com maior variabilidade dos tempos médios de serviço devem ser situados na zona final da linha.

2.8. Conclusões

Os problemas de planeamento e gestão a enfrentar na organização da produção de grandes quantidades de produtos em linhas de fabrico são vários e de difícil resolução. No que toca ao balanceamento das linhas, dada a sua complexidade, é frequente o recurso a regras heurísticas que permitem obter, na generalidade, soluções boas em tempo útil.

Particularmente a nível das linhas com forte componente de mão de obra, em que a variabilidade introduzida pelas características inerentes ao comportamento humano aumenta o grau de incerteza relativamente ao desempenho global da linha, torna-se ainda mais complexo avaliar a melhor opção a implementar.

É neste âmbito valioso o recurso a ferramentas de simulação. No entanto, para que os resultados que se obtêm com recurso à simulação sejam válidos é necessário que esta seja desenvolvida de forma adequada.

A integração de ferramentas de simulação em sistemas de apoio aos responsáveis pela tomada de decisões possibilita uma análise mais cuidada e exaustiva dos problemas a enfrentar e do modo como podem ser resolvidos, permitindo diminuir o risco de pôr em funcionamento configurações de linha pouco eficientes.

Capítulo 3

Simulação

3.1. Introdução

A simulação é uma técnica utilizada na análise de sistemas complexos em que é demasiado caro, difícil ou mesmo impossível, realizar experiências com o sistema real. As suas aplicações são várias, sendo algumas das áreas em que mais tem sido utilizada, o estudo de sistemas de produção, de sistemas económicos, de fluxo de tráfego, organização de redes de distribuição, e escalonamento de serviços e pessoal, para enumerar apenas alguns casos.

A simulação é usada essencialmente para adquirir conhecimento sobre o sistema e realizar experiências que permitam avaliar acções alternativas ou a evolução futura do sistema, de modo a apoiar a tomada de decisões.

Particularmente a nível dos problemas de planeamento e gestão de linhas de fabrico manuais, dada a sua complexidade e grau de variabilidade presente, a simulação pode ser bastante útil na medida em que permite analisar e comparar balanceamentos, e fornecer informação útil aos responsáveis de modo a auxiliar as suas decisões.

A realização de um estudo de simulação envolve várias fases, durante o desenvolvimento das quais é necessário analisar cuidadosamente as características do sistema, tendo sempre em atenção os objectivos do estudo, para que os resultados fornecidos sejam válidos. Uma das fases mais importantes para o sucesso de uma simulação, e determinante para que os resultados obtidos sejam válidos é a modelização do sistema em análise, por esse motivo será abordada mais pormenorizadamente.

Assiste-se a uma crescente utilização da simulação no estudo de sistemas, particularmente no que diz respeito à simulação computorizada. Para tal muito contribuiu o aumento do poder

computacional e o desenvolvimento de ferramentas que possibilitam a realização de *interfaces* gráficas agradáveis ao utilizador. Neste trabalho dá-se particular relevância à simulação computorizada. A este nível existem diferentes tipos cuja utilização depende da natureza e características do sistema a analisar.

Descrevem-se em seguida os vários aspectos a ter em consideração durante a realização de um estudo de simulação, os principais problemas a resolver, tipos e mecanismos com que pode ser realizado, bem como alguns desenvolvimentos nesta área.

3.2. Aplicações no âmbito dos sistemas de produção

A simulação é a ferramenta mais adequada ao tratamento de problemas de filas de espera, dada a sua complexidade e à necessidade de se obter informação em regime transitório. Uma grande variedade de problemas, no âmbito dos sistemas de manufactura, pode ser modelizado como problemas de fila de espera. O balanceamento de linhas de fabrico, problema em análise, pode ser visto como um problema de uma série de filas de espera que se alimentam umas às outras.

Uma das áreas de maior aplicação da simulação é sem dúvida a dos sistemas de manufactura, devido não só à grande complexidade presente mesmo em sistemas de média dimensão, mas também devido ao elevado custo que significa a tomada de decisões que se venham a revelar erradas. Os campos de actuação a este nível são essencialmente [Schroeder, 89]:

- ▷ projecto de unidades de produção: situam-se neste âmbito o estudo de colocação e dimensão de, por exemplo, uma fábrica ou supermercado. O estudo do número de caixas num supermercado, de guichés de atendimento num banco ou aeroporto, de médicos de urgência num hospital, do número de postos de trabalho e sua localização, e outros problemas de filas de espera semelhantes.

- ▷ planeamento agregado: modelos de simulação usados para determinar o custo de planos alternativos.

- ▷ escalonamento: neste campo, a simulação é usada para avaliar regras alternativas de escalonamento. Por exemplo, as regras que permitam determinar qual a ordem de processamento das diferentes ordens de fabrico chegadas a um determinado posto de trabalho, de modo a efectuar todo o trabalho no menor espaço de tempo, ou para atingir outro objectivo, da melhor forma.

- gestão de *stocks*: em sistemas de gestão de stocks é vantajoso recorrer à simulação para determinar o impacto, a nível de serviço ao cliente e custo, de regras de aprovisionamento antes de pôr alguma em prática.

- planeamento de requisição de materiais: a simulação é utilizada antes de serem postas em prática alterações ao plano de produção. Permite ao responsável pela tomada de decisões realizar análise "*what if*" antes de desencadear alguma acção.

No âmbito do problema de balanceamento de linhas de fabrico o recurso à simulação surge a vários níveis:

- sequenciamento dos lotes de produtos a fabricar;

- avaliação de balanceamentos de linha e sua comparação antes de decidir qual a configuração a implementar na prática, nomeadamente no que diz respeito à análise dos níveis dos armazéns (*stocks*) entre postos de trabalho, determinação de postos de trabalho gargalo, sensibilidade a avarias de equipamento e absentismo, entre outros;

- localização dos postos de trabalho e postos de inspecção de qualidade.

3.3. Vantagens

São numerosos, e dependentes do problema em questão, os motivos que levam ao recurso à simulação, no entanto [Mize, 68] refere algumas das vantagens que o justificam:

- possibilidade de realizar experiências sobre modelos de sistemas complexos, evitando os custos, riscos e perda de tempo envolvidos em experiências com os sistemas reais.

- hipóteses podem ser formuladas e testadas recorrendo a modelos de simulação. Permite avaliar e comparar regras de decisão e alternativas.

- podem realizar-se previsões e projecções futuras, o que auxilia a realização de planeamentos futuros e auxilia a tomada de decisões.

- permite identificar as variáveis mais importantes, em termos de interacções e efeitos na performance do sistema, podendo ainda realizar-se análises de sensibilidade.

- a escala temporal pode ser controlada, o tempo pode ser expandido, comprimido, ou evoluir de forma realista.

- treino, educação, e orientação de pessoal, estudantes, gestores e da componente humana envolvida em sistemas homem-máquina, pode ser realizado com o auxílio de aplicações de simulação.

- equações matemáticas que não podem ser resolvidas directamente por métodos analíticos, podem resolvidas por aproximação através, por exemplo, da simulação de Monte Carlo.

- controlo operacional de processos de produção pode ser efectuado através de um modelo de simulação adequado. Neste caso, o modelo de simulação seria uma parte integral do sistema de controlo da produção. O desempenho do processo de produção seria continuamente monitorizado e a informação de *feedback* transmitida ao simulador. Seriam então actualizados os recursos, calculados os parâmetros, reajustadas as regras de decisão e o escalonamento, e reatribuídos os recursos.

3.4. Entidades num estudo de simulação

O desenvolvimento de um estudo de simulação pressupõe a utilização de um modelo que represente adequadamente o sistema em questão.

A simulação é então o processo de realizar experiências sobre um modelo do sistema, ao invés de:

- experimentar com o próprio sistema, o que pode ser demasiado custoso e mesmo incomportável;

- obter soluções analíticas de algum problema associado ao sistema, demasiado difícil ou complexo de resolver.

As entidades envolvidas num estudo de simulação são [Zeigler, 95 a)]:

- o sistema real, existente ou proposto, que é fundamentalmente a fonte de informação.

- o modelo, representação do sistema real.

- ▷ o simulador, que executa as instruções do modelo gerando o seu comportamento.

Estas entidades encontram-se ligadas por duas relações:

- ▷ relação de modelização, que liga o sistema real ao modelo, define a adequação do modelo a representar o sistema ou entidade a ser modelizada.
- ▷ relação de simulação, liga o modelo ao simulador, representa de que modo o simulador está apto a executar o modelo.

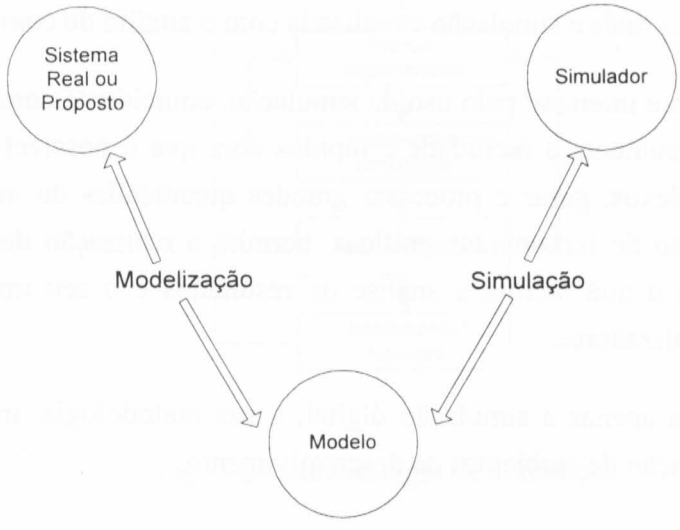


Fig. 3.1 - Entidades envolvidas num estudo de simulação

É essencial que o modelo represente de forma fiel o comportamento do sistema e seus componentes. Usualmente o modelo de um sistema toma a forma de um conjunto de relações lógicas ou matemáticas. Se as relações que o compõem são simples será possível utilizar métodos matemáticos para obter a informação pretendida, ou seja é possível obter soluções analíticas. No entanto, a grande maioria dos sistemas reais são demasiado complexos para se poder avaliar os seus modelos analiticamente, recorrendo-se então à simulação.

Todos os resultados obtidos através de um estudo de simulação dependem do modo mais ou menos fiel da representação que o modelo faz do sistema real. É preciso ter sempre em atenção que o modelo pode estar a encobrir alguns aspectos críticos. Por este motivo a validação do modelo é uma fase muito importante de um estudo de simulação.

Por outro lado, convém ter em atenção que os estudos de simulação não garantem que se encontre a solução óptima para o problema em questão. Apenas se obtêm os resultados que, de

acordo com o modelo, se verificariam ao aplicar na prática determinada decisão. Ou seja, mesmo que o modelo do sistema seja válido e muito preciso, se a melhor alternativa não for avaliada, pode não ser encontrada a melhor solução.

Outro aspecto a ter em consideração antes de realizar um estudo de simulação é a razão custo/benefício proveniente da sua utilização. Uma vez que um estudo de simulação pode necessitar de muita pesquisa, o que aumenta o custo e tempo do seu desenvolvimento, é aconselhável realizar uma análise cuidada dos benefícios que poderá trazer.

Embora um modelo de simulação possa ser um réplica física do sistema que se pretende analisar mas em menor escala, cada vez mais a simulação é realizada com o auxílio de computadores.

Tem-se verificado um crescente interesse pelo uso da simulação, coincidente com o aumento do poder computacional, o que aumenta a facilidade e rapidez com que é possível desenvolver e analisar modelos mais complexos, gerar e processar grandes quantidades de informação. Por outro lado, o desenvolvimento de ferramentas gráficas, permite a realização de aplicações de simulação muito interactivas o que facilita a análise de resultados e o seu manuseamento e compreensão por parte dos utilizadores.

Neste trabalho vai ser focada apenas a simulação digital, a sua metodologia, modelização, os seus diferentes tipos e a descrição de ambientes de desenvolvimento.

3.5. Metodologia

O desenvolvimento de um estudo de simulação envolve várias fases [Dilworth, 92], algumas das quais são realizadas mais do que uma vez.

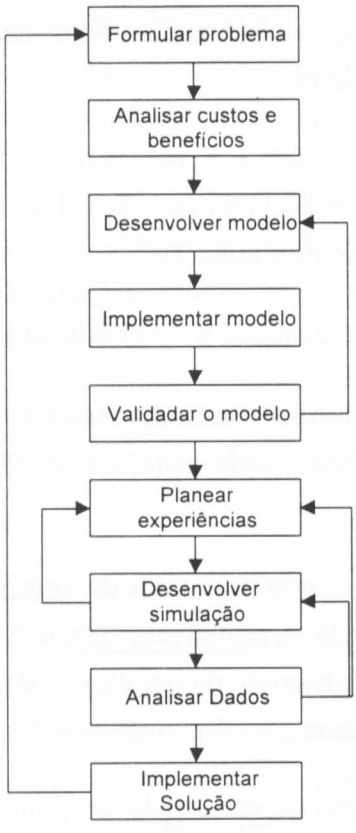


Fig. 3.2 - Metodologia de simulação

A primeira fase diz respeito à formulação do problema. É muito importante definir bem qual o objectivo do estudo que se pretende realizar, sem o qual dificilmente se conseguirá obter os resultados pretendidos.

Em seguida, de modo a assegurar a viabilidade do estudo de simulação, é recomendável a realização de uma análise dos custos e benefícios que daí poderão resultar. Nesta fase dever-se-á ter sempre presente outras alternativas de resolver o problema que possam ser realizadas em menor tempo e com menor custo. A passagem às fases seguintes só se deve efectuar no caso de nesta fase a simulação se revelar a solução ideal.

De modo a ser possível desencadear o processo de simulação, é então necessário obter um modelo do sistema que se pretende estudar. O desenvolvimento do modelo pressupõe a análise do sistema real, das entidades e respectivos atributos que são relevantes para o estudo em questão. O responsável pelo desenvolvimento do modelo deve analisar cuidadosamente quais os aspectos do sistema real que são importantes, que devem ser incluídos no modelo, e aqueles que são desprezáveis para a análise que se pretende realizar, e por isso podem ser postos de lado. O modelo deve ser uma representação fiel do sistema real, reproduzindo o comportamento que este

teria nas mesmas condições a que o modelo é submetido. Só deste modo é possível ter confiança nos resultados obtidos através da simulação.

A importância da proximidade entre o modelo e o sistema real é determinante no sucesso de um estudo de simulação. Daí a extrema relevância da fase de validação do modelo, que se deve ter presente durante todo o desenvolvimento da simulação.

A fase seguinte é implementar o modelo de modo a ser possível trabalhar sobre ele.

O modelo pode ser uma réplica em menor escala do sistema real, no caso por exemplo de maquetas de edifícios, mas o mais vulgar é cada vez mais recorrer-se ao uso de computadores para esse efeito.

No caso da simulação por computador, esta fase trata de codificar o modelo através de uma linguagem que o computador compreenda. A este nível existem diversas variantes, que vão desde as linguagens de programação de uso genérico, às linguagens de simulação mais específicas, e por isso mais simples e flexíveis de utilizar para desenvolvimento de aplicações de simulação.

Um dos aspectos cruciais para o sucesso de um estudo de simulação é a confiança no modelo utilizado, por isso validar o modelo é uma fase importante que deve ser tida em atenção durante todo o processo. O desenvolvimento de um estudo baseado num modelo errado, ou seja, que não corresponde à realidade, pode não só impedir o atingir dos objectivos pretendidos, como levar a conclusões que possam originar a tomada de decisões erradas.

Não existe nenhum teste que possa ser usado para garantir que um modelo é 100 por cento válido, o que torna esta fase ainda mais delicada. No entanto, um procedimento que poderá ser efectuado será recorrer a uma pessoa familiarizada com o sistema real para verificar e dar a sua opinião sobre o modelo. Outro procedimento bastante comum é a comparação de resultados obtidos através do modelo com aqueles que foram obtidos com o sistema real nas mesmas condições de entrada e estado inicial.

De modo a obter-se a informação pretendida com a simulação de um dado sistema, é fundamental identificar quais as variáveis relevantes para o comportamento em estudo. A análise de sensibilidade a variações nessas variáveis permite identificar de que forma afectam a resposta do sistema. O desenvolvimento de experiências que permitam chegar às conclusões pretendidas deve ser cuidadosamente planeado de modo a não serem realizadas mais experiências do que as estritamente necessárias, o que aumenta o tempo e logo os custos associados ao desenvolvimento do estudo de simulação.

O estudo deve ser conduzido de modo a recolher-se toda a informação necessária de acordo com o estudo que se pretende realizar. Durante a fase de projecto da simulação devem ser cuidadosamente determinados os dados a recolher para evitar que se tenha de repetir a simulação, o que encareceria o estudo.

Os dados obtidos através da simulação devem ser então analisados, para de acordo com o objectivo inicial se elaborarem conclusões. Nesta fase é frequente o recurso a técnicas de estatística para análise dos dados resultantes.

Alguns casos típicos de conclusões dizem respeito a medidas de performance da aplicação de diferentes regras, ou a intervalos de confiança dos valores de determinados parâmetros do sistema.

A utilidade do modelo de simulação desenvolvido não termina após a análise dos dados resultantes da simulação. Ao documentar os resultados obtidos e após implementar a solução será possível comparar os dados resultantes do estudo realizado sobre o modelo com os dados obtidos com o sistema real. Deste modo será possível validar o modelo desenvolvido aumentando-se a confiança nos resultados obtidos com o seu auxílio, o que é especialmente importante para convencer os agentes de tomada de decisões da sua credibilidade.

3.6. Modelização

A análise e modelização são dois dos passos mais importantes no estudo de um sistema.

A impossibilidade de realizar experiências directamente sobre os sistemas, que se pretendem estudar ou optimizar, deve-se essencialmente ao custo que isso poderia acarretar, à impossibilidade de realizar alterações e poder voltar ao estado inicial sem qualquer prejuízo em termos de operacionalidade e custo, e à complexidade da grande maioria dos sistemas, o que torna a sua manipulação muito difícil.

É crescente o recurso a modelos, uma vez que quando construídos correctamente permitem obter resultados muito próximos dos que se obteriam na realidade, sem os riscos e dificuldade inerentes à realização de experiências com o próprio sistema.

Um modelo é uma representação de um sistema, desenvolvido com o objectivo de o estudar. O modelo deve ser suficientemente detalhado e válido para permitir ao analista ou responsável pela tomada de decisões a sua utilização com a garantia de que os mesmos resultados se verificariam no sistema real.

No caso de um estudo de simulação, a elaboração de um modelo do sistema que se pretende simular é uma das fases mais críticas e determinantes, uma vez que a confiança nas conclusões que se possam obter depende da forma mais ou menos adequada com que o modelo representa o sistema.

Um dos principais dilemas ao modelizar um sistema é determinar qual o grau de pormenor que se vai incluir, uma vez que quanto mais detalhado for o modelo mais características do sistema se podem analisar, mas por outro lado mais complexo é o modelo, o que dificulta a sua manipulação e a obtenção de resultados.

Ao elaborar um modelo há que ter sempre em atenção o objectivo final, de modo a captar quais as entidades, respectivos atributos e relações entre elas, que são importantes nesse âmbito, deixando de lado aqueles aspectos que não sendo relevantes iriam servir para complicar o modelo sem se obter daí qualquer tipo de vantagem.

Ao utilizar um modelo deve-se ter sempre presente o facto de que este é apenas uma representação da realidade e de que é necessário efectuar constantemente a sua validação, de modo a não se tirarem conclusões que na prática não coincidiriam com a realidade.

Por outro lado a reutilização de um modelo para a realização de um estudo cujo objectivo é diferente daquele para o qual foi inicialmente desenvolvido, deve suscitar cuidados adicionais uma vez que o modelo pode não ser adequado a este novo estudo. Pode então dar-se a necessidade de completar o modelo acrescentando-lhe detalhes que para o estudo inicial eram irrelevantes mas que agora são importantes, o que pode dar mesmo origem ao desenvolvimento de outro modelo de raiz.

Algumas das vantagens inerentes à utilização de modelos são [Fishman, 78]:

- ▷ permite ao investigador organizar os seus conhecimentos teóricos e observações empíricas sobre o sistema;
- ▷ leva a um melhor conhecimento do sistema;
- ▷ salienta a necessidade de detalhe e relevância;
- ▷ aumenta a velocidade com que uma análise pode ser realizada;
- ▷ ferramenta para testar a vantagem de modificações no sistema;
- ▷ é mais fácil de manipular do que o sistema;

- ▷ permite controlar mais fontes de variação do que o estudo directamente sobre o sistema permitiria.

3.6.1.Taxonomia

A modelização de sistemas não está apenas ligada à simulação, mas também a uma série de outras disciplinas, como sejam Inteligência Artificial, ou Engenharia de *Software*. Surge daí a necessidade de uma comum taxonomia.

A taxonomia proposta por Fishwick em [Fishwick, 92 a)] apresenta um conjunto de tipos de modelos básicos (conceptual, declarativo, funcional) e uma maneira de integrar os vários tipos (multimodelização).

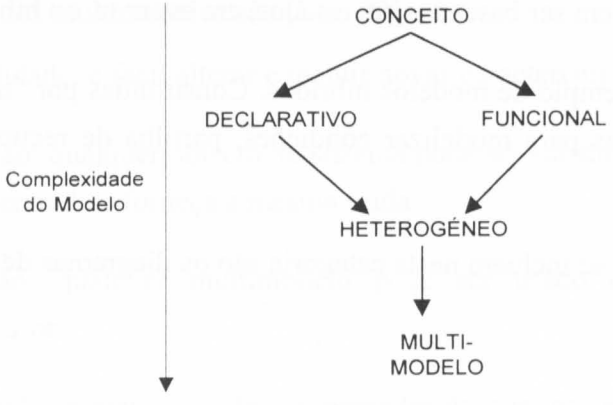


Fig. 3.3 - Taxonomia proposta por Fishwick

3.6.1.1.Modelos Conceptuais

Os modelos conceptuais são uma primeira aproximação lógica ao sistema, focam os objectos e as relações entre eles, deixando de parte a componente dinâmica do sistema. Servem como base de conhecimento a partir da qual são desenvolvidos modelos mais detalhados.

O conhecimento sobre um sistema poderá ser representado através de, por exemplo, redes semânticas ou diagramas entidade-relação, no entanto mais adequada revela-se a utilização de metodologias orientadas a objectos. Além das vantagens inerentes às suas características de polimorfismo e hereditariedade [Rumbaugh, 91], a principal razão é o facto de permitirem a elaboração de modelos muito próximos da realidade e que por isso mesmo são facilmente

compreendidos pelos vários intervenientes no processo, desde a pessoa que faz a modelização aos utilizadores finais.

A partir de um modelo conceptual é possível derivar dois outros tipos de modelos, os declarativos e os funcionais.

3.6.1.2.Modelos Declarativos

Modelos que realçam a dinâmica dos sistemas, caracterizada como transições de estados ou de eventos.

As funções ou restrições que caracterizam uma transição são postas de parte, sendo focada a estrutura dos estados (ou eventos).

Os modelos declarativos podem ser baseados em estados, em eventos, ou híbridos.

As redes de Petri são um exemplo de modelos híbridos. Constituídas por "transições" e "sítios", são particularmente indicadas para modelizar condições, partilha de recursos, e problemas de sincronização.

Outros tipos de modelos que se incluem nesta categoria são os diagramas de estados, modelos de Markov, e grafos de eventos.

3.6.1.3.Modelos Funcionais

Modelos que se focam nas funções em vez de nas transições entre estados.

O sistema é descrito através de um conjunto de blocos interligados, cada qual representando uma função que transforma a respectiva entrada na saída. Este tipo de modelos é muito utilizado em engenharia de controlo (sinais contínuos) e em redes de filas de espera (sinais discretos).

Os modelos funcionais poderão conter diagramas de estado embebidos nos blocos funcionais, o que permite o refinamento do comportamento estado a estado, passando já a incluir-se na categoria de multimodelos, neste caso, com dois níveis. No entanto há uma importante distinção a fazer, nos modelos declarativos cada estado representa o estado do sistema, enquanto que nos modelos funcionais os estados são locais à função específica.

3.6.1.4.Multimodelos

Um multimodelo é um modelo constituído por outros modelos. O objectivo é obter uma representação unificada do sistema que contém vários níveis de abstracção e diferentes perspectivas.

Cada nível ou segmento de um multimodelo pode ser representado por um tipo diferente de modelo, em que os de nível mais baixo refinam os de nível mais alto.

Ao permitir diferentes tipos de modelos, cria-se um ambiente de modelização mais flexível em que cada nível é representado da forma mais adequada.

A estrutura hierárquica dos multimodelos aproxima-os das metodologias orientadas a objectos tornando-as particularmente adequadas à sua implementação.

Algumas das vantagens dos multimodelos são [Lee, 93]:

- ▷ extensibilidade: é fácil alterar e incluir novas características no modelo.
- ▷ substituição: qualquer objecto do sistema pode ser substituído por outro que aceite a mesma entrada e forneça a mesma saída.
- ▷ reutilização: qualquer multimodelo pode ser usado como componente num modelo maior.
- ▷ compreensão: é mais fácil de compreender do que, por exemplo, um conjunto de complexas equações matemáticas.

Para simular um multimodelo é necessário que um tipo de modelo aceite como entrada a saída de um outro tipo de modelo. Ou seja, que cada modelo reconheça a saída de outro modelo de nível mais refinado como entrada.

Para sincronizar o sistema ao nível mais alto é usado um coordenador, que processa as entradas externas e chama o modelo apropriado. O coordenador será ainda responsável por criar e inicializar cada modelo e seus componentes, e organizá-los na hierarquia especificada.

A multimodelização pode ser usada não só para integrar diferentes tipos de modelos numa hierarquia mas também para integrar modelos provenientes de disciplinas diferentes.

Um exemplo de uma aplicação em que são integrados, recorrendo à multimodelização, modelos provenientes de áreas tão diversificadas como a inteligência artificial, simulação, planeamento e controlo, pode ser consultado em [Lee, 93].

3.6.2.Modelização Orientada a Objectos

Uma das características da modelização orientada a objectos, que a torna mais atractiva no âmbito da simulação, é o facto de permitir elaborar representações muito próximas da realidade, devido ao mapeamento quase directo entre entidades do sistema real e objectos do modelo.

Durante a fase de análise do sistema, as suas componentes e respectivas interacções são identificadas.

O mapeamento de objectos físicos em objectos da aplicação, que depois serão implementados em computador (fase de implementação), possibilita a representação dos sistemas tal qual as pessoas os vêm.

Esta proximidade com a realidade facilita o processo de análise de um sistema, que vai desde a observação dos processos a entrevistas com os intervenientes nesses processos, uma vez que os modelos desenvolvidos são rapidamente entendidos por qualquer pessoa que lide directamente com o sistema. Deste modo a comunicação entre os analistas e intervenientes no sistema é facilitada, o que é muito importante para se obter um modelo válido da realidade e se definirem bem quais os objectivos do estudo a desenvolver.

Outra característica chave para o sucesso das metodologias orientadas a objectos, é o facto de os dados e operações sobre esses dados serem combinados numa única entidade, o que permite estruturar melhor o conhecimento sobre os elementos do sistema.

Na modelização orientada a objectos os componentes do sistema são representados como objectos que comunicam entre si através da troca de mensagens. Cada objecto tem associado um conjunto de atributos, variáveis que descrevem o estado do objecto, e operações, procedimentos que permitem alterar o valor dos atributos, ou seja, o estado do objecto.

Objectos com a mesma estrutura de dados (atributos) e comportamento (operações) são agrupados em classes. Uma classe é uma abstracção que descreve as propriedades importantes para uma aplicação e ignora o resto. A escolha das classes é arbitrária e depende da aplicação.

Cada classe descreve uma infinidade de objectos. Cada objecto é uma instância da sua própria classe. Cada instância de uma classe tem valores próprios para cada atributo, mas partilha os nomes dos atributos e operações com as outras instâncias da mesma classe.

3.6.2.1.Propriedades

Uma das características mais inovadoras introduzidas pelas metodologias orientadas a objectos é a possibilidade de objectos diferentes poderem ter atributos e operações com o mesmo nome.

A mesma operação pode ter comportamento diferente consoante as diferentes classes em que é aplicada. Chama-se a esta particularidade polimorfismo. Uma operação é uma acção ou transformação que um objecto realiza ou à qual está sujeito. A implementação específica de uma operação em determinada classe é designada como método. Uma vez que um operador nas metodologias orientadas a objectos é polimórfico, pode existir mais do que um método de o implementar.

No mundo real, uma operação é simplesmente uma abstracção de comportamento análogo presente em diferentes tipos de objectos. Cada objecto sabe como realizar as suas próprias operações. Numa linguagem de programação orientada a objectos, automaticamente é seleccionado o método correcto para implementar uma dada operação, baseado no nome da operação e no nome da classe ao qual deverá ser aplicada. O utilizador de uma operação não necessita de saber quantos métodos existem para implementar uma determinada operação polimórfica.

Hereditariedade é a partilha de atributos e operações entre classes baseada numa relação hierárquica. Uma classe pode ser refinada em sucessivas subclasses. Cada subclasse herda todas as propriedades da sua superclasse e adiciona as suas propriedades únicas.

A possibilidade de agrupar propriedades comuns a várias classes numa superclassse e de herdar as propriedades da superclasse, pode reduzir consideravelmente repetições nos modelos e programas, o que é uma grande vantagem de utilizar este tipo de metodologias.

Abstracção consiste em focar os aspectos essenciais de uma entidade deixando de lado as suas propriedades acidentais. Uso da abstracção significa focar a atenção naquilo que os objectos são e fazem, antes de decidir como devem ser implementados. A abstracção tem uma consequência muito importante que é chamada extensibilidade, ou seja, a habilidade de estender uma aplicação adicionando novas definições sem alterar as anteriores.

Encapsulamento consiste em separar os aspectos externos de um objecto, aqueles que são acessíveis aos outros objectos, dos detalhes de implementação, que são escondidos. Encapsulamento evita que um programa se torne tão interdependente que uma pequena alteração dê origem a grandes modificações. A implementação de um objecto pode ser alterada sem que as aplicações que o utilizam sejam afectadas. A característica de combinar a estrutura de dados e comportamento numa única entidade, torna o encapsulamento mais poderoso do que em outras linguagens que não o permitem. Esta característica dá origem a uma importante vantagem da utilização deste tipo de metodologias que é a facilidade de reutilização de *software*.

É possível fazer desenvolvimento orientado a objectos sem fazer análise orientada a objectos, mas complexo conciliar o desenvolvimento recorrendo a técnicas tradicionais com a análise orientada a objectos.

A vantagem de realizar análise e programação orientada a objectos é que o resultado final vai com certeza de encontro aos requisitos do utilizador, uma vez que é usada a mesma linguagem ao longo de todo o processo.

3.6.2.2.Vantagens

A simulação é, regra geral, usada para a análise, aquisição de conhecimento e avaliação de decisões a implementar em sistemas complexos ou de grandes dimensões. A identificação das entidades físicas que constituem o sistema e o seu mapeamento quase directo em objectos do modelo, facilita de sobremaneira a elaboração de modelos de sistemas complexos. A proximidade com a realidade, que os modelos elaborados segundo estas metodologias apresentam, permite por outro lado uma melhor comunicação entre as pessoas intervenientes no sistema e os analistas, o que é de extrema importância para a elaboração de modelos válidos.

A organização da informação de modo hierárquico e a propriedade de hereditariedade, características destas metodologias, permitem a elaboração de modelos mais fáceis de verificar e facilitam a organização do conhecimento sobre o sistema, tão mais importante quanto maior a complexidade dos sistemas envolvidos.

As vantagens de extensibilidade e reutilização de *software*, inerentes às metodologias orientadas a objectos, favorece o desenvolvimento de protótipos.

Por vezes na fase de análise de um sistema, os utilizadores têm alguma dificuldade em exprimir os seus requisitos, o recurso a protótipos revela-se então extremamente importante para clarificar

o mais cedo possível todos esses aspectos. Por outro lado em projectos de longa duração os requisitos podem-se ir alterando ao longo do tempo.

Outro factor de relevo é a possibilidade de estender e reutilizar o modelo à medida que se vai adquirindo conhecimento sobre o sistema. Deste modo, é possível utilizar modelos já desenvolvidos, e que necessitam apenas de ser completados, corrigidos ou integrados noutros mais abrangentes, para realizar simulações de âmbito diferente ou mais alargado sobre um sistema. Tal facto permitirá aumentar a rapidez de desenvolvimento de simulações, por vezes factor crítico para a sua realização e mesmo para o auxílio na tomada de decisões.

3.6.2.3.Métodos

O interesse em métodos orientados a objecto tem sido crescente. Este fenómeno é evidenciado pelo número de artigos publicados em vários jornais e revistas da especialidade, livros e outros meios. Diversos projectos de grande dimensão adoptaram uma abordagem e tecnologia orientada a objecto e os resultados positivos que se verificaram levaram a que mais organizações seguissem o mesmo caminho [Hong, 93].

O conjunto de métodos que a seguir se apresenta não pretende de modo nenhum ser exaustivo, mas apenas dar uma ideia da maioria dos métodos existentes actualmente:

Balin	Colbert	Objectory
Booch	Fresco	Rumbaugh
Berard	Fusion	Shlaer-Mellor
Coad-Yourdon	Martin-Odell	Wirsf-Brock

Para realizar uma primeira selecção dos vários métodos existentes deve ter-se em conta o seguinte:

- os métodos devem ser aceites pela comunidade de utilizadores como "verdadeiros" métodos orientadas a objectos.
- devem estar descritos em bibliografia adequada ou num livro, para que exista suficiente informação disponível.

Outros critérios a ter em atenção serão a maturidade, a suficiência, e a aceitação geral dos métodos.

Os métodos que sattisfazem estes critérios são [Hong, 93]:

- ▷ Booch;
- ▷ Coad-Yourdon;
- ▷ Martin-Odell;
- ▷ Rumbaugh;
- ▷ Shlaer-Mellor;
- ▷ Wirfs-Brock.

Efectua-se em seguida uma breve descrição dos métodos seleccionados [Hutt, 94], de modo a poderem ser comparadas.

Booch

O objectivo do método proposto por Booch é o de fornecer um processo e notação para desenvolvimento e comunicação de sistemas de *software* orientados a objectos [Hutt, 94].

É um método vocacionado fundamentalmente para a fase de concepção de um projecto.

O domínio do problema é modelizado segundo duas perspectivas diferentes: a estrutura lógica do sistema e a estrutura física do sistema. Para cada uma, são modelizadas as semânticas estáticas e dinâmicas. Este método descreve várias técnicas para se realizarem estas tarefas, e fornece um conjunto completo de notações gráficas.

Coad & Yourdon

Os conceitos deste método giram à volta de princípios para gerir a complexidade dos sistemas.

A arquitectura deste método consiste em quatro componentes: uma componente de interacção humana, uma componente de domínio do problema, componente de gestão de tarefas e componente de gestão de dados.

Os modelos são organizados numa estrutura com cinco camadas, nas quais são identificadas as classes, objectos, relações, atributos, serviços e trocas de mensagens.

Martin-Odell

Método baseado na lógica e na teoria dos conjuntos. Os autores fornecem uma introdução extensa de todos os conceitos e discutem a gestão da complexidade dos sistemas.

Um dos pontos fundamentais deste método é a descrição do comportamento dos objectos.

São propostas técnicas para identificar objectos e relações entre eles, para descrever o seu comportamento dinâmico e captar os processos nos mais altos níveis dos sistemas.

Rumbaugh

O processo de desenvolvimento segundo este método é subdividido em quatro fases distintas: análise, projecto do sistema, projecto de objectos e implementação.

São fornecidas técnicas para descrever o domínio do problema sob três perspectivas diferentes. A estrutura estática dos objectos e classes, o comportamento dinâmico dos objectos e as características funcionais de transformação de informação.

Shlaer-Mellor

As características mais marcantes deste método são a integração de um conjunto de modelos de Análise Orientada a Objectos que podem ser simulados para verificação, e uma inovadora aproximação ao projecto, designada por Projecto Recursivo (*Recursive Project*).

Foca essencialmente a descrição das aspectos estáticos dos objectos, sendo os aspectos dinâmico e funcional descritos brevemente.

São propostas técnicas para modelizar os aspectos estático, dinâmico e funcional dos objectos.

Wirsf-Bock

Cobre essencialmente a fase de análise do ciclo de vida de desenvolvimento de sistemas. São utilizados dois conceitos principais para gerir a complexidade dos sistemas, a abstracção e encapsulamento.

Este método descreve o domínio do problema como um conjunto de objectos cooperantes.

Um sistema é desenvolvido em duas fases. Na fase inicial são identificados os objectos, as suas responsabilidades e colaborações necessárias. A fase de análise detalhada optimiza os resultados da fase anterior.

Na segunda fase são introduzidas duas técnicas gráficas: uma para visualização de classes e respectivas estruturas, e outra para representação de classes, subsistemas e relações cliente-servidor.

3.6.2.4.Estudo comparativo de metodologias

Berard [Berard, 93] avalia os diferentes métodos segundo a perspectiva de que um método é completo quando fornece um conjunto completo de tarefas, directivas, funções e responsabilidades, e heurísticas. Este conceito tem duas dimensões:

- cobertura, que indica qual a cobertura que é feita do ciclo de desenvolvimento de *software*, e quais são as actividades de engenharia *software* abordadas.
- profundidade, que indica qual o nível de detalhe com que cada actividade de engenharia de *software* é abordada.

O estudo comparativo realizado por Berard inclui alguns dos métodos referidas acima e analisa-os de acordo com o critério apresentado.

Booch: tem menos cobertura que o método de Coad-Yourdon, mas muito mais profundidade na área de projecto, com pouca cobertura na análise. É forte nas heurísticas, mas fraco nos projectos.

Coad-Yourdon: tem cobertura (cobre a análise, projecto e programação), mas muito pouca profundidade, e muito poucas heurísticas.

Rumbaugh: tem cobertura (cobertura na análise e projecto). É forte nos processos (boa profundidade), mas fraco nas heurísticas.

Martin-Odell: tem cobertura (análise e concepção), sendo fraca nos processos (reduzida profundidade). Tem algumas heuristicas.

Shlaer-Mellor: tem cobertura (análise e projecto), e profundidade.

Wirsf-Bock: carece de cobertura (principalmente focada no projecto e programação), mas tem alguma profundidade.

Desta comparação, e utilizando dados de Berard [Berard, 95], no que diz respeito às heurísticas, podemos concluir que os métodos mais completas são: Coad-Yourdon, Rumbaugh, e Shlaer-Mellor, sendo o método de Rumbaugh o melhor colocado.

Assiste-se agora a uma tentativa de uniformizar os vários métodos. Surge nesse âmbito o Método Unificado, desenvolvido por Booch e Rumbaugh, que reúne as melhores ideias dos vários métodos existentes, e cujo objectivo é o de se tornar um *standard* no domínio da análise e projecto orientado a objectos.

3.7. Tipos de simulação

Por vezes um sistema é simulado através de um modelo físico, em menor escala, do sistema que se pretende analisar. Este tipo de simulação é designado como simulação analógica.

Uma simulação computorizada, é uma simulação em que o modelo é executado através de um programa de computador.

Dada a sua grande flexibilidade e facilidade de desenvolvimento e utilização crescentes, a simulação computorizada vem-se impondo cada vez mais como o meio mais adequado para a simulação e análise de sistemas.

É a simulação computorizada que é focada ao longo deste trabalho, sendo a ela que se pretende referir quando se utiliza apenas a palavra simulação.

No âmbito da simulação computorizada existem diferentes tipos de simulação, cuja utilização depende do tipo de sistema a analisar.

Atendendo à forma como as suas variáveis de estado evoluem ao longo do tempo, é possível caracterizar os sistemas como discretos ou contínuos. Sistemas discretos serão aqueles cujas variáveis de estado alteram os seus valores apenas em determinados pontos de tempo. Sistemas contínuos aqueles cujo estado se altera continuamente ao longo do tempo.

Associada a esta caracterização dos sistemas surge a distinção entre a simulação discreta de eventos e a simulação contínua, embora a correspondência não seja necessariamente unívoca.

3.7.1.Simulação de Eventos Discretos

A simulação de eventos discretos diz respeito à modelização da evolução dos sistemas ao longo do tempo através de uma representação em que as variáveis de estado só se alteram em determinados pontos do tempo. [Law, 82]

A esses pontos do tempo estão associados eventos que podem provocar uma alteração no estado do sistema. Embora por vezes os eventos possam não conduzir à alteração do estado do sistema mas sim, por exemplo, significar apenas o fim da simulação ou outra qualquer condição semelhante.

Numa simulação de eventos discretos é necessário contabilizar o tempo da simulação e um mecanismo que o faça evoluir. A variável que contém o valor do tempo é designada por relógio de simulação.

Os mecanismos de evolução temporal numa simulação de eventos discretos são: o mecanismo de incremento de tempo fixo e o avanço para próximo evento.

3.7.1.1.Incremento fixo de tempo.

Neste caso o relógio da simulação é avançado de pequenos intervalos de tempo. Ao fim de cada incremento no relógio da simulação verifica-se se ocorreu algum evento durante esse intervalo de tempo. Caso tal se verifique, o(s) evento(s) que ocorreram são tratados como se tivessem acontecido apenas no fim do intervalo. Se tiver ocorrido mais do que um é necessário estabelecer regras que permitam realizar o seu escalonamento. As principais desvantagens do uso deste mecanismo são o erro que é introduzido ao considerar que os eventos ocorreram apenas no fim do intervalo, e a necessidade de decidir qual dos eventos deve ser processado em primeiro lugar quando eventos que não são simultâneos na realidade são assim tratados pela simulação.

Estes problemas podem ser minimizados reduzindo o intervalo de tempo, o que por outro lado aumenta o tempo de execução.

O recurso a este mecanismo é aconselhável no caso de sistemas em que os eventos ocorrem em instantes múltiplos de um intervalo de tempo.

3.7.1.2.Avanço para próximo evento.

O relógio da simulação é inicializado a zero e os tempos de ocorrência de futuros eventos são determinados. O relógio da simulação vai a partir de então evoluir para o tempo de ocorrência do próximo evento, sendo efectuada a actualização do estado do sistema, geração de futuros eventos (caso tal seja desencadeado pelo estado presente), e actualização dos tempos de ocorrência dos eventos. De salientar que neste mecanismo os períodos de inactividade são ignorados.

Neste caso o número de iterações, para cobrir o mesmo tempo de simulação, é menor que com o mecanismo anterior, além disso gera um escalonamento preciso para a evolução do sistema em vez de aproximações.

A simulação de sistemas de manufactura é habitualmente uma simulação de eventos discretos. Como o estado do sistema é alterado quando ocorrem determinados acontecimentos, como sejam por exemplo o fim de processamento de uma Ordem de Fabrico num determinado posto de trabalho, ou a avaria de uma máquina, sendo quase sempre irrelevantes os intervalos entre ocorrências deste género, o tipo de simulação mais adequado é quase sempre uma simulação discreta de eventos, com mecanismo temporal de avanço para próximo evento. No entanto, caso se pretenda, por exemplo, tratar de forma agregada o fluxo de produtos pela fábrica, podem ser utilizadas equações diferenciais e uma simulação contínua.

Dada a importância da simulação de eventos discretos com mecanismo temporal de avanço para próximo evento, vai fazer-se uma análise das principais componentes de uma simulação deste género.

Componentes de uma simulação de eventos discretos com mecanismo de avanço para próximo evento [Law, 82]:

- ▷ Estado do sistema: conjunto de variáveis necessárias para descrever o sistema.
- ▷ Relógio da simulação: variável que contém o valor actual do tempo simulado.
- ▷ Lista de eventos: lista que contém os tempos em que os eventos de qualquer tipo devem ocorrer.
- ▷ Contadores estatísticos: variáveis utilizadas para registar informação estatística sobre a performance do sistema em estudo.
- ▷ Rotina de Inicialização: subrotina utilizada para inicializar o modelo da simulação e colocar o relógio da simulação a zero.

- Rotina de tempo: subrotina que analisa a lista de eventos, determina o próximo evento a ser realizado e avança o relógio da simulação para o tempo a que esse evento deve ocorrer.

- Rotina de evento: subrotina que actualiza o estado do sistema quando um evento de determinado tipo ocorre (existe uma subrotina para cada tipo de evento).

- Gerador de relatórios: subrotina que realiza cálculos para determinar as medidas de desempenho pretendidos, com base no valor dos contadores estatísticos, e gera relatórios com esses valores.

- Programa principal: chama a rotina de tempo para determinar qual o próximo evento a ocorrer e depois transfere o controlo para a subrotina correspondente a esse tipo de evento.

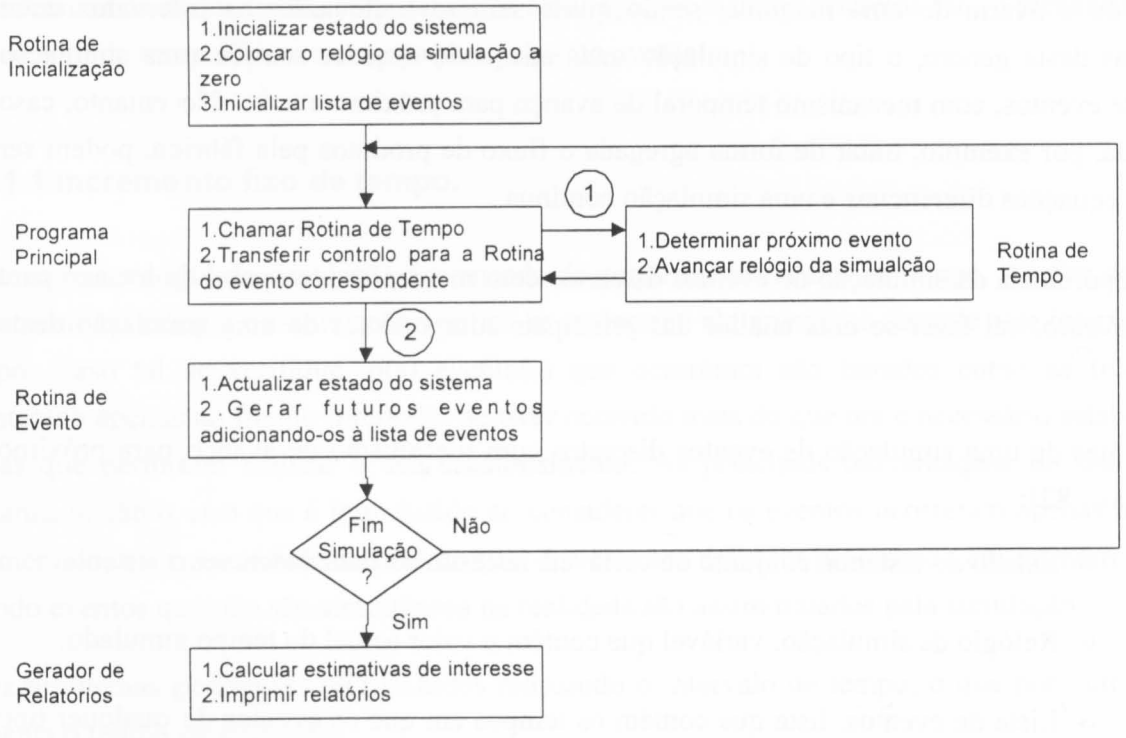


Fig. 3.4 - Fluxograma de funcionamento do mecanismo de avanço para próximo evento

3.7.2.Simulação Contínua

Simulação contínua diz respeito à modelização ao longo do tempo de um sistema cujas variáveis de estado evoluem de forma contínua com o tempo. Os modelos deste tipo de sistemas envolvem equações diferenciais, que reflectem a evolução das variáveis de estado ao longo do tempo. Se as equações diferenciais forem simples é possível obter soluções analiticamente, no entanto para a maioria dos modelos tal não é possível, e por vezes recorre-se a técnicas de análise numérica.

3.7.3.Simulação Discreta/Contínua Combinada

A simulação discreta/contínua combinada permite construir um modelo que inclua aspectos de simulação de eventos discretos e simulação contínua, o que facilita a modelização de sistemas que não são completamente discretos nem completamente contínuos.

Em [Law, 82] são descritos os três fundamentais tipos de interacções que podem ocorrer entre alterar discreta e continuamente variáveis de estado:

- ▷ Um evento discreto pode provocar uma alteração discreta no valor de uma variável de estado contínua.
- ▷ Um evento discreto pode fazer com que a relação que rege uma variável de estado contínua se modifique num determinado instante de tempo.
- ▷ Uma variável de estado contínua que atinge uma certa referência pode provocar a ocorrência de um evento discreto ou o seu escalonamento.

3.7.4.Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é usada para tratar problemas estocásticos ou determinísticos, em que a passagem do tempo não é importante. É na generalidade uma simulação estática em vez de dinâmica.

3.8. Ambientes de desenvolvimento

Sendo a simulação uma ferramenta a que cada vez mais se recorre para a avaliação e auxílio à tomada de decisões, determinação de diferentes linhas de acção, e mesmo para ganhar conhecimento sobre os sistema a utilizar e prever o seu comportamento, aborda-se de seguida alguns dos desenvolvimentos recentes no seu âmbito, como sejam: ferramentas de auxílio à realização de simulações, ambientes genéricos para o seu desenvolvimento, a sua interdisciplinariedade, e ambientes de simulação paralela e distribuída.

3.8.1.Ferramentas de Simulação

Aplicações de simulação podem ser desenvolvidas recorrendo a linguagens de programação genéricas ou específicas, no entanto, as linguagens específicas de simulação revelam-se, passado o período inicial de adaptação, mais simples e flexíveis.

Várias são as ferramentas desenvolvidas para a realização de simulações, que permitem ao programador desenvolver aplicações específicas sem ter que se preocupar com certos detalhes comuns a todas elas, como por exemplo a organização de eventos por ordem de ocorrência e o seu escalonamento, no caso de simulações discretas de eventos.

Em seguida descrevem-se algumas ferramentas deste tipo.

3.8.1.1.CPSim

Ferramenta de simulação de uso genérico, desenvolvida em linguagem C [Boyan Tech, 95] com o principal objectivo de gerar simulações com bom desempenho, permite a elaboração de simulações de eventos discretos.

Permite:

- ▷ simulações a velocidades de execução elevadas, principalmente em plataformas paralelas
- ▷ portabilidade de código de aplicações entre Pcs e *workstations* para máquinas paralelas
- ▷ simulações paralelas sem *deadlock*

- ▷ sincronização e troca de mensagens em máquinas paralelas
- ▷ mapeamento automático ou manual de objectos em processadores
- ▷ funções estatísticas *standard* e geração de relatórios.
- ▷ O utilizador pode:
- ▷ definir o seu modelo de simulação
- ▷ atribuir objectos da simulação aos processadores seleccionados
- ▷ gerar, executar, e destruir eventos
- ▷ utilizar geradores de números aleatórios
- ▷ imprimir relatórios de simulação.

O CPSim é constituido pelo *kernel*, que permite sincronização, escalonamento, prevenção de *deadlock*, e troca de mensagens em plataformas multicomputador, e por livrarias que consistem em funções desenvolvidas em C usadas para a construcção das aplicações de simulação.

Existem duas versões do *kernel*, o CPSim1.0 e o CPSim1.0s. O primeiro para simulações em arquitecturas paralelas, e o segundo para máquinas uniprocessador (Pcs e *workstations*). As bibliotecas são as mesmas para as duas versões [Groselj].

O código de uma aplicação desenvolvido em CPSim1.0s é totalmente portável para uma máquina multiprocessador.

Os modelos de simulação CPSim são representados como grafos de objectos que comunicam entre si. A existência de um arco de um objecto para outro indica que o primeiro pode desencadear a ocorrência de eventos no segundo. Um evento pode ser, por exemplo, a chegada de um cliente, sinal, ou mensagem.

O grafo de objectos é repartido pelos processadores, e a programação na troca de mensagens de eventos. Se dois objectos que comunicam residem no mesmo processador, a transmissão de eventos consiste em inserir a estrutura de dados que representa o evento na fila de espera de eventos do objecto receptor.

Além das mensagens de eventos, o CPSim recorre a mensagens de eventos nulos, que são mensagens de sincronização.

3.8.1.2.+SIM

Pacote de simulação desenvolvido em C++, que permite a realização de simulações baseadas em processos discretos [Little].

Baseado nas facilidades do Simula, providência objectos activos, instâncias das classes C++, como unidades de simulação.

3.8.1.3.SimPack

Conjunto de bibliotecas em C e C++ e de programas executáveis para desenvolvimento de simulação computorizada, desenvolvido por Dr. Paul Fishwick na Universidade de Florida [Fishwick, 92 b)], [Fishwick, 95 a)]. O objectivo é o de servir de ponto de partida, a investigadores e estudantes, para o desenvolvimento de simulações.

Um dos objectivos do desenvolvimento do SimPack foi o de construir um ambiente de simulação que abrangesse uma grande variedade de tipos de modelos. Deste modo é possível desenvolver simulações de eventos discretos, simulações contínuas e combinadas.

É constituído por várias componentes que incluem desde modelos de restrições, modelos funcionais, modelos espaciais, multimodelos, a algumas ferramentas autónomas, por exemplo o *Xsimcode* para construção de aplicações em terminais X.

Particularmente interessante ao desenvolvimento de simulações de sistemas de fabrico, é o Sim++ que surge da componente de modelos funcionais do SimPack . Trata-se de *software* para desenvolvimento de simulações de modelos de filas de espera, que liberta o programador de alguns detalhes como, por exemplo, o escalonamento dos eventos, prioridades e preempção, e inclui ainda geradores de números aleatórios.

O Sim++ foi desenvolvido em C++, corre em ambiente DOS/OS2/Windows, compilado com o Borland Turbo C++, e em Unix, compilado com o g++.

O desenvolvimento seguindo metodologias orientadas a objectos traz, além de vantagens como a abstracção, hereditariedade, encapsulamento e polimorfismo, algumas consequências importantes principalmente a nível de extensibilidade e correcção.

Os pormenores de utilização do Sim++ para desenvolvimento de simulações de eventos discretos pode ser avaliado recorrendo ao manual [Cubert]. Aqui pretende-se apenas abordar as suas características mais relevantes em termos de organização das entidades envolvidas.

3.8.1.3.1.Características do Sim++

Os eventos além de terem associado um tempo de ocorrência, têm também uma prioridade, e um identificador que faz a correspondência com cada diferente classe de eventos, identificação que vem do SimPack.

No Sim++ os eventos podem também ser identificados, de forma alternativa, pelo nome de uma função que identifica a classe de eventos e que corresponde ao nome da rotina chamada quando um evento dessa classe ocorre.

O Sim++ permite ao utilizador fazer evoluir a simulação de três modos diferentes. Modo automático e semi-automático, que requerem que os eventos sejam identificados recorrendo ao nome da rotina associada à sua execução, e o modo manual, em que os eventos são identificados por um identificador, e que permite compatibilizar o Sim++ com o SimPack

O escalonamento de eventos significa colocá-los em fila de espera FEL (*Future Event List*), cujo tipo é configurável, podendo ser, por exemplo uma pilha ou uma lista ligada. Os eventos na FEL estão ordenados por tempo de ocorrência crescente qualquer que seja a sua ordem de inserção. Eventos com o mesmo tempo de ocorrência são ordenados e realizados de modo FIFO (*First in First out*).

Uma *facility* fornece serviço e tem associada uma fila de espera que poderá ou não ser limitada. O serviço consiste em uma ou mais unidades servidoras, cada uma das quais identificada pelo *token* que está correntemente a ser servido e respectiva prioridade. Uma *facility* pode ter qualquer número de unidades servidoras superior a zero. A *facility* está livre quando tiver um ou mais servidores disponíveis, e ocupada quando todos os servidores estiverem ocupados.

Os *tokens* são as entidades que requerem serviço. Têm associada uma prioridade, a qual, caso não tenham todos prioridade idêntica, permite estabelecer a ordem em que são servidos. No caso de todos terem a mesma prioridade os *tokens* são servidos por ordem de chegada (FIFO).

Um processo na simulação de um sistema de computadores será modelizado como um *token* e o processador como uma *facility*, tal como, por exemplo um passageiro na simulação de um aeroporto será modelizado como *token* e o guiché de atendimento ou o avião como *facility*. No

caso dos sistemas de produção, por exemplo, as Ordens de Fabrico ou lotes a realizar são modelizados como *token*, enquanto que as máquinas ou operários são modelizados como *facilities*.

Um *token* ao encontrar uma *facility* ocupada é colocado na fila de espera depois dos outros *tokens* com prioridade idêntica, resultando numa fila de espera do tipo FIFO se todos tiverem a mesma prioridade.Quando a *facility* deixa de estar ocupada o *token* que está no início da sua fila de espera é retirado e é colocado um evento no topo da FEL, para ser executado imediatamente, o que vai desencadear o início da realização do serviço sobre esse *token*.

É possível utilizar mecanismos de preempção para que um *token* prioritário seja atendido imediatamente. Deste modo, no caso de um *token* com prioridade inferior à do *token* preemptor estar a ser servido, o *token* com prioridade mais baixa é colocado na fila de espera passando a ser servido o mais prioritário. Depois de este ter sido servido, o *token* no topo da fila de espera passa a ser atendido, durante o tempo que falta até concluir o seu serviço.

O Sim++ possui mecanismos que permitem fazer avançar a simulação passo a passo observando-se o conteúdo da FEL e estado das facilidades. Possui ainda vários geradores de números aleatórios e funções que permitem realizar estatísticas, por exemplo, acerca da quantidade de *tokens* servidos, tempos de utilização e tamanho máximo atingido pela fila de espera das *facility*.

3.8.2.Ambientes genéricos para modelização e simulação

De seguida descreve-se um ambiente de simulação genérico e portável para construção de modelos hierárquicos de eventos discretos.

3.8.2.1.DEVS (*Discrete Event System Specification*)

A modelização de eventos discretos encontra cada vez maior aplicação na análise e projecto de sistemas de manufactura complexos, sistemas de comunicação e de computadores, entre outros.

Ao contrário dos sistemas contínuos, que desde há longo tempo, mesmo antes do aparecimento dos primeiros computadores, são descritos através de equações matemáticas, a simulação de eventos discretos tornou-se possível e evoluiu com o crescimento do poder computacional. Formalismos para elaboração de modelos independentes dos computadores, paralelos às equações diferenciais para sistemas contínuos tardaram em aparecer. No entanto, hoje reconhece-

se que a compreensão de sistemas complexos pode ser muito facilitada rcorrendo a formalismos matemáticos [Zeigler, 95 a)].

O formalismo proposto por Zeigler, fornece um modo de especificar matematicamente um sistema. Basicamente, um sistema consiste numa base de tempo, entradas, estados, saídas, e funções que determinam os estados e saídas obtidos a partir de determinada entrada e estado inicial [Zeigler, c)].

A principal mais valia do formalismo DEVS está no modo simples de caracterizar como uma linguagem de simulação de eventos discretos especifica os parâmetros de um sistema desse tipo.

O formalismo DEVS fornece um meio para construção de modelos de simulação. São especificados modelos básicos, a partir dos quais é possível desenvolver modelos mais complexos, e como esses modelos se podem ligar de forma hierárquica.

Um modelo básico contém a seguinte informação:

- conjunto de portos de entrada, por onde são recebidos os eventos externos
- conjunto de portos de saída, por onde são enviados eventos para o exterior
- conjunto de variáveis de estado e parâmetros
- função de avanço de tempo, que controla os tempos das transições internas
- função de transições internas, que especifica qual o estado para que o sistema irá transitar depois de passar o tempo especificado pela função de avanço de tempo
- função de transições externas, que especifica como o estado do sistema muda quando uma entrada é recebida
- função de saída, que gera saída para o exterior mesmo antes de uma transição interna ocorrer.

Modelos básicos podem ser interligados para formar modelos multi-componente. Modelos multi-componente são implementados como modelos ligados. Um modelo ligado indica como se devem interligar os modelos componentes para formar um novo modelo, o qual poderá vir a ser utilizado como componente num modelo ligado de maior dimensão, sendo possível deste modo realizar construções hierárquicas.

Um modelo ligado contém a seguinte informação:

- ▷ conjunto dos componentes
- ▷ para cada componente, as suas influências
- ▷ conjunto de portos de entrada através dos quais são recebidos eventos externos
- ▷ conjunto de portos de saída através dos quais são enviados eventos externos
- ▷ especificação da ligação, que consiste em:
- ▷ ligação de entrada externa, liga os portos de entrada do modelo ligado aos portos de entrada dos modelos componentes: direcciona as entradas recebidas pelo modelo ligado para os modelos componentes correspondentes.
- ▷ ligação de saída externa, liga as saídas dos modelos componentes aos portos de saída do modelo ligado: deste modo quando é gerada uma saída num modelo componente, ela é enviada ao porto de saída do modelo ligado correspondente, sendo depois transmitida para o exterior.
- ▷ ligação interna, liga os portos de saída dos modelos componentes aos portos de entrada de outros modelos componentes: quando uma entrada é gerada por um componente ela pode ser enviada para o porto de entrada de determinado componente.
- ▷ função que selecciona de entre os componentes, que têm o menor tempo de ocorrência para o próximo evento, qual deve executar o seu próximo evento.

Em [Praehofer] é apresentada um sistema de monitorização baseado no paradigma de controlo inteligente do DEVS.

O DEVS - Scheme é um ambiente de simulação genérico para construção de modelos hierárquicos de eventos discretos, baseado no formalismo DEVS. Foi desenvolvido na linguagem PC - Scheme (Texas Instruments) e corre em ambiente DOS.

DEVS - Scheme é, em grande parte codificado em SCOOPS, PC - Scheme orientado a objectos. A hierarquia de classes pode ser consultada em [Zeigler, 95 b)].O resultado é uma excelente base para combinar Inteligência Artificial e técnicas de simulação.

O poder computacional das plataformas de computação paralela aumenta as perspectivas de desenvolvimento de simulações de eventos discretos de alta performance. Deste modo Zeigler e

Kim apresentam em [Zeigler b)] um ambiente de simulação, baseado no formalismo DEVS, para sistemas multi-computador de memória distribuída.

As aplicações desenvolvidas em sistemas deste tipo são geralmente dependentes da arquitectura. Os protocolos de sincronização têm que ser adaptados, o que torna difícil migrar de um sistema para outro, uma vez que a implementação de protocolos de sincronização não é tarefa fácil, dado que a troca de mensagens envolve *overhead* de comunicações e programação complexa.

A principal motivação de Zeigler e Kim foi o de elaborar um ambiente de simulação de eventos discretos genérico e portável, que salvaguarde o responsável pela modelização de lidar com a tecnologia de troca de mensagens, enquanto explora as vantagens em termos de velocidade e memória das plataformas de elevada performance.

A portabilidade de modelos entre plataformas permite que um modelo seja desenvolvido numa plataforma série e depois facilmente transportado para uma plataforma paralela/distribuída.

Um modelo DEVS não deve ser rescrito ou modificado para correr em ambiente série, paralelo ou distribuído. Para atingir os objectivos propostos, foi desenvolvida uma biblioteca HCCL (*Heterogeneous Container Class Library*) que pode ser implementada em plataformas série e paralela/distribuída. A ideia é fornecer um conjunto de primitivas orientadas a objecto para utilização de recursos computacionais.

A HCCL fornece paradigmas de computação paralela e concorrente a um alto nível de abstracção, encapsulando os detalhes dos mecanismos de troca de mensagens subjacentes.

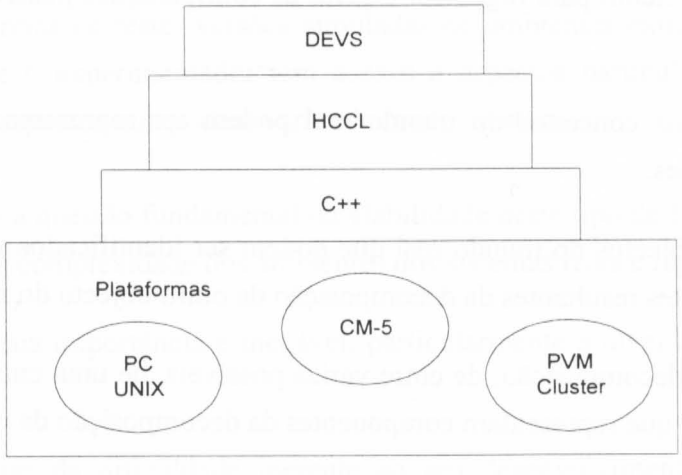


Fig. 3.5 - Implementação do DEVS sobre classes C++

Sobre a HCCL encontra-se o formalismo DEVS, tal como ilustrado na Fig. 3.5.

Deste modo o utilizador só terá que lidar com a interface de construção em DEVS, sem ter que se preocupar com o ambiente de execução.

Inicialmente desenvolvido para uma plataforma paralela (CM-5) esta arquitectura de simulação pode ser utilizada em qualquer ambiente heterogéneo de computação distribuída.

3.8.2.2.SES/MB (*System Entity Structure/Model Base*)

Ferramenta para gestão de bases de modelos em ambientes de simulação avançados. Essas facilidades vão desde um repositório partilhado de modelos, a meios de auxiliar o utilizador a desenvolver modelos que satisfaçam as suas necessidades em cada estudo [Zeigler a)].

A SES é um esquema declarativo de representação de conhecimento que caracteriza a estrutura de uma família de modelos em termos de decomposições, taxonomias e ligações.

Decomposições são esquemas que representam a forma com que um objecto se decompõe em componentes. Os esquemas são hierárquicos uma vez que os componentes podem eles próprios ser decompostos em subcomponentes.

Taxonomias fornecem método para organizar e classificar os diferentes tipos de objectos.

As ligações indicam como os modelos se interligam e quais as restrições que se aplicam.

Uma aplicação da ferramenta SES/MB é o projecto de sistemas, onde serve como esquema de representação do conhecimento para organizar e gerar as configurações possíveis para o sistema em projecto.

Ao construir uma SES os conceitos do mundo real podem ser representados por entidades, aspectos ou especializações.

Entidades representam objectos do mundo real que podem ser identificados independentemente ou representar componentes resultantes da decomposição de outro objecto do mundo real.

Aspecto representa uma decomposição, de entre várias possíveis, de uma entidade. Os filhos de um aspecto são entidades que representam componentes da decomposição da entidade pai.

Especialização é um modo de classificar entidades, usado para exprimir alternativas na escolha dos componentes do sistema a ser modelizado. O resultado de uma especialização são entidades que representam variantes da entidade especializada.

A SES é utilizada no ambiente de simulação DEVS - Scheme como uma especificação de alto nível que é transformada num modelo ligado equivalente. No entanto, a sua principal característica é servir como esquema de representação do conhecimento para organizar uma família de modelos numa base de modelos.

As estruturas de entidades são puras quando não têm especializações e têm no máximo um aspecto. Estas estruturas de entidades podem ser transformadas directamente num modelo hierárquico. Para gerar várias alternativas é possível reduzir uma SES a várias estruturas de entidades puras, a partir das quais, através da função de transformação, são obtidos modelos hierárquicos.

3.8.3.Integração com Inteligência Artificial

Têm surgido vários projectos de investigação no âmbito da Inteligência Artificial que envolvem experimentação controlada, em que um investigador varia as características do sistema e do ambiente onde este se insere, e mede a variação do desempenho do sistema face a essas alterações.

Surgem, ao mesmo tempo, duas ferramentas de investigação que vêm ganhando particular relevância:

- *benchmarks*: tarefas *standard* bem definidas, representativas de uma vasta classe de problemas, que permitem avaliar aspectos o desempenho global de um sistema.

- plataformas de teste: versões simuladas de ambientes extremamente complexos, em que o experimentador tem acesso a aspectos particulares do ambiente e a outros aspectos que podem variar de modo aleatório.

Levanta-se no entanto a questão fundamental da viabilidade deste tipo de ferramentas em relação ao realismo com que a complexidade dos ambientes dos sistemas reais é representada.

De qualquer modo a sua importância é inegável, particularmente a nível de projecto de agentes de decisão.

Neste âmbito, e apesar da dificuldade inerente ao seu desenvolvimento têm surgido várias plataformas de teste [Hanks, 93] algumas das quais são abordadas nos pontos seguintes.

3.8.3.1. Tileworld

Plataforma destinada à realização de experimentação com agentes em ambientes dinâmicos e imprevisíveis.

Consiste numa grelha rectangular na qual podem ser colocados o agente, algumas peças, obstáculos, e alguns buracos. O agente pode deslocar-se para cima, para baixo, para a esquerda ou direita, a não ser que saia fora da grelha ou vá de encontro a um obstáculo. O objectivo do agente é colocar peças nos buracos. Cada buraco tem uma capacidade e pontuação associada. À medida que o agente vai preenchendo buracos com peças a sua pontuação vai aumentando, no final a sua performance é avaliada em termos da pontuação somada.

Esta plataforma inclui eventos exógenos (eventos não planeados): objectos podem aparecer e desaparecer no decurso de uma simulação, de modo controlado pelo experimentador.

Buracos, obstáculos e peças aparecem e desaparecem probabilisticamente de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo investigador antes da realização de uma simulação. Trata-se de uma característica muito importante, uma vez que permite a exploração sistemática de mundos com variações características, desde os que mudam rapidamente aos que se alteram pouco frequentemente.

Ao agente é fornecida uma estrutura de dados que descreve o estado do sistema. O uso dessa informação é deixado ao cuidado do investigador, que pode desencadear um mecanismo para a distorcer.

O agente quando pretende desencadear uma determinada acção, chama o simulador como uma subrotina, especificando a acção que deseja realizar. O simulador actualiza então o estado do sistema, passando ao agente o novo estado numa estrutura.

O investigador descreve um ambiente especificando o tamanho da grelha, a duração da simulação, os parâmetros das probabilidades de aparecimento e desaparecimento de peças, obstáculos e buracos, e a distribuição de buracos e sua capacidade.

Algumas das características desta plataforma são a sua simplicidade, natureza abstracta, e o facto de ser parametrizável. É um ambiente muito simples em que o agente pode realizar poucas acções, os objectos têm poucos atributos e a ocorrência de eventos exógenos não é complexa.

A NASA desenvolveu um *Tileworld* independente, o NTW. Duas características fundamentais distinguem estes dois simuladores. Uma é o facto de o NTW não atribuir nenhuma medida de

performance do tipo da pontuação existente no *Tileworld*. O que constitui o sucesso do agente fica totalmente a cargo do experimentador. Outra distinção é a natureza da interface entre o agente e o ambiente. No *Tileworld* o agente chamava o simulador como subrotina sendo a informação trocada sob a forma de uma estrutura de dados.

No NTW o agente e o simulador correm assincronamente: os comandos do agente são colocados numa fila de espera e mais tarde eventualmente executados. Ao agente não é dada informação sobre o sucesso das operações que tentou efectuar, tendo que monitorizar explicitamente o "mundo" de modo a avaliar os efeitos das suas acções.

3.8.3.2.MICE

Trata-se de outro simulador baseado numa grelha, desenvolvido para investigar o problema de coordenação de vários agentes autónomos.

É constituído basicamente por uma grelha e agentes, que podem ser usados para simular objectos como peças e fogos em florestas.

Os comandos básicos são: *Move*, faz deslocar um agente para uma célula adjacente, e *Link*, usado pelo agente para pegar em objectos.

Não permite explicitamente eventos exógenos, embora estes possam ser implementados através de agentes que tenham o efeito desejado, por exemplo tornando uma célula molhada para simular a chuva.

A principal diferença entre o MICE e o *Tileworld*, é o facto de o MICE permitir ao experimentador a definição das capacidades de acção e monitorização dos agentes, e o efeito de acções simultâneas por parte dos agentes.

O MICE pode ser visto mais como uma ferramenta para construção de plataformas do que propriamente um simulador.

3.8.3.3.Phoenix

Ferramenta para testar e implementar múltiplos agentes autónomos em ambiente complexo. Destinado à simulação de cenários de combate a incêndios.

O ambiente *Phoenix* inclui uma representação do "*Yellowstone National Park*" e de tarefas que implementam fogos.

Os agentes geram tarefas que simulam meios de combate ao fogo, como *bulldozers*, torres de vigia, ou helicópteros. Algumas das tarefas dos agentes vão desde o deslocarem-se ao longo do mapa, prevêr o curso dos fogos, planear como os *bulldozers* devem atacar o fogo, a monitorizar e detectar falhas na actuação.

O simulador do *Phoenix* tem três funções principais: manter e actualizar o mapa, sincronizar as actividades dos agentes e ambiente, implementadas como tarefas independentes, e recolher informação.

Os agentes monitorizam e alteram o ambiente enviando mensagens para o simulador.

Os agentes não têm operadores pré-determinados. O ambiente *Phoenix* contém dois tipos de objectos, agentes e fogos. Cada célula do mapa do ambiente contém informação que os agentes e fogos usam para determinar o seu comportamento.

Definir um ambiente consiste em definir o mapa, suas características topográficas incluindo elevações, estradas, rios e edifícios, e processos como fogos e vento. Definir um agente é, regra geral, mais complicado porque envolve a definição de sensores, actuadores, um plano, componente reactiva, mapas do ambiente, entre outros.

Phoenix difere dos simuladores apresentados anteriormente, na medida em que se destina a simulações de um domínio específico, em vez de implementar um domínio abstracto.

À parte esta diferença é bastante semelhante ao MICE, uma vez que coloca poucas restrições no modo como agentes e eventos exógenos podem monitorizar e alterar o ambiente.

3.8.3.4. Truckworld

Plataforma para teste de teorias de execução reactivas e para fornecer motivantes exemplos para a teoria do conhecimento sobre sistemas dinâmicos.

Um agente é um camião que consiste em dois braços, duas plataformas de carga, vários sensores, e vários outros componentes como tanque de combustível, direcção e controlador de velocidade. Opera num ambiente constituído por estradas e localidades. As estradas ligam as localidades, que estão preenchidas por objectos. O simulador coloca algumas restrições no comportamento dos objectos, que pode ser bem complexo.

Eventos exógenos, como trovoadas ocorrem periodicamente no ambiente.

A ocorrência de eventos pode depender do seu carácter aleatório e das características do ambiente (por exemplo, as trovoadas podem ocorrer mais facilmente em certas localidades e períodos do dia).

O *Truckworld* fornece uma variedade de sensores simulados, desde câmaras que visualizam os objectos, sonares para localizar os objectos, a máquinas raio-X que localizam objectos dentro de contentores. Os sensores tipicamente incluem parâmetros de erro.

A comunicação entre um agente e o simulador é efectuada por dois canais. O agente realiza acções e monitoriza o ambiente através do canal de comando, e usa o canal de controlo para manipular o estado interno do simulador (por exemplo, avançar o relógio da simulação, ou obter estatísticas sobre o ambiente)

Os principais objectivos do desenvolvimento desta plataforma foram:

- ▷ obter uma plataforma para gerar problemas interessantes no âmbito do conhecimento deliberativo e reactivo, sem restringir a um domínio em particular.
- ▷ restringir de certo modo as capacidades de actuação e monitorização dos agentes sem impedir a flexibilidade necessária ao investigador para desenvolver as suas experiências.

Esta plataforma ocupa uma posição entre os simuladores abstractos como os *Tileworlds*, e específicos a um domínio como o *Phoenix*, e plataformas de construção como o MICE.

O *Truckworld* implementa uma série de operadores específicos para o agente (ao contrário do MICE), mas menos restrições que o *Tileworld* ou *Phoenix* quanto à natureza dos objectos e interacção entre os agentes e esses objectos.

3.8.3.5.MESS (*Multiple Event Stream Simulator*)

Trata-se de uma plataforma, desenvolvida em Lisp, para desenvolvimento de ambientes de simulação adequados ao teste de planos e planeadores on-line ou em tempo real.

Algumas das características que se pretenderam atingir com o desenvolvimento desta plataforma foram [Anderson, 95], [Anderson]:

- ▷ independência de domínio;

- ▷ independência de planeador, o que significa que qualquer tipo de planeador pode ser integrado no MESS;
- ▷ extensibilidade para o operador;
- ▷ portabilidade para plataformas *Common Lisp*;
- ▷ plataforma flexível;

A construção de um ambiente de simulação em MESS é efectuado definindo os eventos que podem acontecer, e as consequentes modificações no estado do sistema, e definindo os processos que originam os eventos.

O simulador possui um "motor" central que controla todos os eventos e processos e invoca a realização de eventos. Os eventos ou processos a serem realizados estão ordenados numa lista, designada por "lista de eventos pendentes", por ordem de ocorrência. O seu modo de funcionamento consiste em retirar os eventos ou processos que se encontram à cabeça da lista de eventos pendentes, actualizar o estado do sistema, e modificar a interface gráfica com o utilizador, caso seja necessário.

Esta plataforma suporta também a ocorrência de actividades, que ao contrário dos eventos têm uma determinada duração temporal. As actividades são tratadas como um par de eventos, que representam o início e fim da actividade. Qualquer evento que aconteça durante a realização de uma actividade pode interferir com ela, recorrendo a uma função de interacção, que pode afectar a ocorrência da actividade, do evento, ou de ambos.

A plataforma MESS está particularmente adequada a suportar agentes em tempo real. Um agente de planeamento em tempo real, é integrado numa como um processo (*event stream*). O agente descobre o estado da simulação através de eventos sensores, e actua produzindo eventos executores.

Existem várias plataformas que suportam agentes tempo real. No entanto, a maioria usa o tempo do CPU para medir o tempo de computação requerido por um agente, mapeando o tempo de CPU em tempo de simulação que passa enquanto o agente "pensa". Esta aproximação apesar de intuitiva e fácil de implementar tem algumas desvantagens, como sejam o facto de a simulação correr de modo diferente em diferentes CPU, sistemas operativos, implementações Lisp, e mesmo versões diferentes do compilador de Lisp.

No caso do MESS a aproximação por tempo de CPU é substituída, e recorre-se ao *Timed Common Lisp* (TCL), em que são atribuídas durações, em unidades arbitrárias, às primitivas da linguagem Common Lisp, na qual são implementados os agentes. No início de execução de um agente é colocado um contador a zero, o qual vai ser incrementado aquando da realização de cada uma das primitivas. No fim da actuação do agente, o valor do contador é mapeado em tempo de simulação. O recurso ao TCL suporta o planeamento em tempo real, uma vez que o TCL fornece uma "máquina virtual", independente da plataforma, para execução e código Lisp que implementa o pensamento de um agente. O TCL é flexível e extensível, de modo que a duração dos modelos pode ser alterada e novos modelos podem ser definidos.

Ambientes de simulação desenvolvidos recorrendo ao MESS permitem testar hipóteses sobre o comportamento e performance de diferentes agentes e sistemas.

3.8.4.Simulação Distribuída e Paralela

A simulação distribuída preserva todas as vantagens da simulação, como sejam, a segurança, economia, controlo, visibilidade e repetibilidade que possibilita a análise de sistemas já desenvolvidos ou a desenvolver.

Ao projectar novos sistemas, como, por exemplo, plataformas industriais, hospitais ou sistemas bancários, é necessário segurança no que diz respeito ao seu comportamento futuro em relação a determinados critérios. A simulação permite a modelização e análise do comportamento dos sistemas antes da sua implementação real. No entanto, a simulação pode envolver uma grande carga computacional, tanto maior quanto mais complexo é o sistema que se pretende analisar e o nível de detalhe a incorporar.

Por outro lado, pode ser necessário realizar várias corridas de simulação, de modo a se obterem intervalos de confiança suficientemente pequenos para os parâmetros que se pretendem avaliar, ou para se explorar um campo mais alargado de parâmetros.

Naturalmente simulações mais rápidas podem ser obtidas utilizando-se mais recursos computacionais, particularmente vários processadores operando em paralelo. Tal introduz alguma complexidade adicional no que se refere à noção de tempo global, sendo necessário recorrer a algoritmos de sincronização que assegurem que as relações causa-efeito são correctamente reproduzidas na simulação.

Em [Ferscha, 95] é feita a distinção entre simulação paralela e distribuída:

- ▷ simulação paralela: as instruções a realizar em cada processador são controladas por uma unidade central, que força o sincronismo entre computações independentes.
- ▷ simulação distribuída: estratégia de simulação que recorre a vários processadores, que operam assincronamente em paralelo, com mecanismos de sincronização explícitos entre processos.

A nível da aplicação, um método óbvio para reduzir o tempo de realização de simulações que exploram um vasto espaço de estados, é a atribuição de réplicas independentes do mesmo modelo de simulação, possivelmente com diferentes parâmetros de entrada, aos processadores disponíveis.

Estudos de simulação em que as experiências devem ser sequenciais devido à iteração entre réplicas, ou seja, quando os parâmetros de entrada da réplica *i* são determinados pelos resultados da réplica i-*1*, não permite distribuição a nível da aplicação. Neste caso a distribuição a nível de subrotinas, como rotinas de geração de números aleatórios, processamento de eventos, entre outras, pode acelerar a realização de simulações.

Quando é possível decompor o modelo de simulação em modelos componentes ou sub-modelos, o que é natural em modelos de simulação orientados a objectos, é possível atribuir tarefas associadas a diferentes componentes a processadores paralelos. Deste modo a distribuição é a nível de componentes.

A nível de eventos existem dois tipos de abordagem, a centralizada e a descentralizada.

Numa abordagem em que a lista de eventos é uma estrutura de dados centralizada, a aceleração pode ser conseguida distribuindo eventos concorrentes pelos processadores. A distribuição a este nível é particularmente adequada a multiprocessadores com memória partilhada, em que a lista de eventos pode ser acedida por todos os processadores, sendo os eventos com o mesmo tempo processados em paralelo.

Um maior grau de paralelismo pode ser obtido ao explorar estratégias que permitam a simulação concorrente de eventos com diferentes tempos de ocorrência. Nesta abordagem é necessário recorrer a protocolos para sincronização local, que podem aumentar os custos de comunicação dependendo da dispersão dos eventos pelo tempo do modelo de simulação.

Comum às várias estratégias de simulação com distribuição a nível de eventos, é a divisão da tarefa global de simulação em processos lógicos que comunicam entre si.

Deste modo a simulação pode ser vista como a cooperação de um conjunto de processos lógicos interactuantes, cada um dos quais simula um sub-espaço do espaço de tempo a ser simulado.

Existem duas estratégias de simulação paralela de eventos discretos, a "Conservativa" e a "Optimista".

3.8.4.1.1.Método conservativo

O problema básico deste tipo de mecanismos é o de determinar qual o evento que é seguro processar de modo a evitar a ocorrência de erros de causalidade. Erros de causalidade surgem quando, ao simular um sistema, o futuro pode afectar o passado.

Para evitar os erros de causalidade é necessário que o evento *Emin* com menor tempo de ocorrência seja seleccionado da lista de eventos para ser executado. Se por qualquer motivo esta regra não for seguida, e for executado um evento *Ex* com maior tempo de ocorrência, é possível que *Ex* altere as variáveis de estado usadas por *Emin*, sendo deste modo o passado alterado pelo futuro.

Neste tipo de métodos se um processo contém um evento E1 com tempo T1 e é determinado que é impossível que receba outro evento com tempo inferior a T1, então o evento E1 pode ser processado sem que possam existir erros de causalidade.

Se, por outro lado, o processo não contém nenhum evento que possa ser executado de modo seguro, isto é sem pôr em risco a causalidade do sistema, o processo deve bloquear. Tal origina preocupações adicionais de modo a não se criarem situações de *deadlock*. *Deadlock* ocorre quando existe um ciclo de processos bloqueados em que cada um se encontra bloqueado por outro processo do mesmo ciclo.

O desempenho dos mecanismos conservativos é determinada pelo grau com que os processos podem prever eventos futuros, ou mais importante, o que não irá ocorrer no futuro simulado.

3.8.4.1.2.Método optimista

Os processos executam os eventos prosseguindo com a simulação desde que tenham eventos à espera para ser processados. Deste modo o relógio local de cada processo pode adiantar-se em relação ao dos seus processos antecedentes, podendo por isso receber um evento com tempo de ocorrência inferior ao tempo registado no seu relógio local. Se isto acontecer o processo efectua

um "roll back" no tempo simulado, sendo anulados os efeitos dos eventos processados prematuramente.

A execução prematura de um evento provoca a recuperação do estado do processo lógico e das mensagens de evento enviadas a outros processos. A recuperação do estado, obriga a que periodicamente seja guardado o estado do processo. A recuperação de eventos enviados a outros processos é conseguida através do envio de uma anti-mensagem que anula a original.

Se um processo recebe uma anti-mensagem a anular uma mensagem anterior que ainda está em fila de espera, essa mensagem é retirada da fila não sendo executado o evento a ela associado. Se por outro lado o processo já processou a mensagens que se pretende anular, ele vai ter que realizar um *roll-back* para recuperar o estado anterior.

Um dos métodos optimistas mais implementado é o *Time Warp* [Ferscha, 95].

O tipo de aplicação é importante para determinar qual o método mais adequado a cada caso. Em sistemas dinâmicos, com interacções irregulares os métodos optimistas são preferíveis, particularmente se a sobrecarga introduzida pela necessidade de guardar o estado dos processos não for significativa. Por outro lado em aplicações em que é possível prever o futuro, os algoritmos conservativos são adequados.

Se a aplicação não tem nenhuma destas características será difícil obter boa performance, mesmo que possua um elevado grau de paralelismo.

Descrevem-se em seguida algumas plataformas de simulação paralela e distribuída de eventos discretos.

3.8.4.2.Exeter

Turner apresenta um ambiente de simulação, sistema *Exeter*, cujo objectivo é o de facilitar a simulação de sistemas reais recorrendo a protocolos de simulação paralela de eventos discretos [Turner].

Algumas das suas características são:

- avaliação de protocolos: o sistema Exeter permite comparar protocolos de simulação alternativos. Pode ser usado para avaliar a adequação de métodos conservativos e optimistas em aplicações de diferentes áreas.

- ▷ paralelização de simulações existentes: permite converter simulações sequenciais já desenvolvidas de modo a serem executadas processadores paralelos sem ser necessário rescrever o código da aplicação.
- ▷ desenvolvimento de novas aplicações: possibilita o desenvolvimento e avaliação de novos protocolos de simulação paralela, e a investigação de variantes de protocolos já existentes.

Existem dois obstáculos a dificultar o recurso a processadores paralelos para realização de simulações de eventos discretos. Um deles é a grande variedade de arquitecturas *hardware* e métodos de programação que, uma vez que ainda não existem standards definidos, tornam difícil transportar aplicações entre máquinas. Outro dos problemas a enfrentar é a pouca transparência da interface apresentada por vários sistemas de simulação paralela, que requer que os utilizadores tenham certos conhecimentos sobre os complexos protocolos de simulação.

No sistema Exeter a portabilidade foi atingida recorrendo à utilização da linguagem Strand, que dá ao sistema independência em relação ao *hardware* e sistema operativo.

A transparência é atingida organizando o sistema em três camadas: a camada de aplicação, a de sincronização e a de comunicação. A camada de sincronização implementa uma livraria com protocolos de simulação conservativos e optimistas. A de comunicação consiste numa rede de *kernels* presentes nos vários processadores, permitindo comunicação fiável entre objectos residentes em diferentes processadores. O utilizador só tem de ter em atenção o processamento de eventos na camada de aplicação, sem ter de se preocupar com os detalhes do método de simulação utilizado.

3.8.4.3.PORTS (*Paralell, Optimistic, Real-Time Simulator*)

Em [Ghosh, 93] é descrito um sistema para simulação discreta de eventos paralela, optimista e em tempo real.

Simuladores tempo real são usados no desenvolvimento de sistemas tempo real dado o custo e perigo de desenvolver o sistema tempo real no ambiente em que será embebido.

Simulação em tempo real requer que os eventos sejam completados antes de se atingir uma determinada data limite (*deadline*).

De modo a ser possível garantir o cumprimento das datas limite é necessário que o simulador seja suficientemente previsível, e que a interacção com o ambiente circundante seja efectuada com o mínimo de latência, ou seja, rápidas comunicações entrada/saída.

No caso de simulações tempo real, os métodos conservativos diferem dos optimistas no aspecto em que, na simulação conservativa não são geradas situações incorrectas, o que acontece é que o sistema bloqueia. Enquanto que nos métodos optimistas há que recuperar de situações erróneas que possam surgir.

Nos métodos optimistas é difícil determinar à partida quantas vezes será necessário voltar atrás, não são por isso métodos previsíveis. Deste modo, protocolos como o *Time Warp* não permitem garantir o cumprimento das datas limite.

Existe uma classe de simulações designadas por NFT *TimeWarp* (*No False Timestamps*), em que são evitados os eventos incorrectos [Ghosh, 93], trata-se no entanto de uma classe muito restrita.

É abordado um tipo de protocolos optimistas em que as mensagens só são enviadas quando é garantido tratar-se de uma mensagem correcta, e provado que este tipo de protocolos é previsivel, não há necessidade de voltar a trás, sendo por isso adequados para garantir o cumprimento das datas de entrega.

O sistema PORTS é constituído por um simulador, conjunto de processos lógicos, módulos para computação do tempo global, módulo para escalonamento e despacho em tempo real, e módulo para gestão de entradas/saídas.

3.8.4.4.Simulação Distribuída Interactiva

O Departamento de Defesa dos EUA, desde há longo tempo que se apoia em ferramentas de modelização e simulação para suporte à análise e treino de aplicações

Os desenvolvimentos a nível de redes de comunicação e computação distribuída permitem alargar os campos de aplicação dessas ferramentas.

A Simulação Distribuída Interactiva (DIS) é uma das tecnologias no âmbito da simulação distribuída. Permite interligar novas e já existentes ferramentas de simulação, e apoia-se no protocolo de comunicação definido pelo standard IEEE 1278. A tecnologia DIS é optimizada

para respostas em tempo real, sendo adequada à simulação de ambientes com requisitos temporais desse tipo [Fitzsimmons, 95].

A importância da DIS a nível do DoD, as suas características, ilustram bem algumas das vantagens e limitações inerentes à simulação distribuída.

O desenvolvimento de novas ferramentas de simulação pode ser caro e envolver uma grande quantidade de tempo. Uma das técnicas de reduzir esses parâmetros, será a reutilização de *software*. A reutilização de *software* ao integrar componentes já desenvolvidos em novas aplicações permite reduzir ambos os parâmetros, no entanto levanta problemas de integração, a maior parte dos quais poderão ser eliminados recorrendo à DIS.

O conceito de simulação distribuída faz com que a simulação deixe de ser vista como um sistema isolado. A possibilidade de sistemas de simulação correrem como aplicações locais que simultaneamente participam como componentes numa simulação distribuída de âmbito mais alargado, introduz novas e atractivas perspectivas de utilização da simulação.

No Departamento de Defesa (DoD) esta possibilidade revela-se muito importante, ao permitir o controlo e sincronização de todos os elementos que compõem a simulação de uma batalha.

A possibilidade de, recorrendo a técnicas de simulação distribuída, realizar treinos de diferentes equipas de combate revela-se extremamente importante para o treino eficaz das forças envolvidas, ou a envolver, em determinado combate. Os benefícios serão a nível individual e de grupo, no entanto a principal vantagem é o aumento da performance na colaboração e coordenação de equipas.

Este aumento de performance no treino de equipas torna-se importante não só a nível de aplicações militares de defesa como também em diferentes áreas de actuação que vão desde, por exemplo, no âmbito dos sistemas de fabrico, o treino de equipas de gestão, de manutenção, e de desenvolvimento de produtos, ao treino de equipas de cirurgia e mesmo de desporto.

Em aplicações do DoD, a simulação distribuída permite que participantes fisicamente dispersos interajam directamente em simulações de combate em tempo real, sem os custos e complicações inerentes a aproximar fisicamente essas entidades.

Um dos problemas que ainda está por resolver, em termos de simulação distribuída em que são interligados ambientes de simulação heterogéneos, é o assegurar que cada simulador tem a mesma vista, ou equivalente, do ambiente que está a ser simulado. A manutenção de bases de dados para cada simulador é um dos modos de lidar actualmente com o problema, no entanto

para que a integração de simuladores heterogéneos seja rápida e eficiente é necessário ultrapassar de vez este tipo de problema.

A simulação distribuída introduz uma nova dimensão ao problema de verificação, validação e aptidão de modelos. No caso da integração de simuladores heterogéneos tem de haver cuidado adicional, de modo a que se garanta que nenhum simulador possui vantagem táctica devido à qualidade superior da sua simulação.

A DIS não é um produto final, mas uma tecnologia que continuará em evolução. Para ilustrar a sua importância em termos de DoD representou, segundo [Shiflett, 95], um dos mais importantes avanços na modelização e simulação de sistemas desde o desenvolvimento do microprocessador.

3.8.4.5.Simulação Distribuída no apoio à tomada de decisões

Sistema complexos de grande escala que envolvem seres humanos, máquinas, computadores, e outro tipo de recursos, requerem, regra geral, que a tomada de decisões seja distribuída por várias pessoas. Frequentemente, tais sistemas têm uma equipa de responsáveis pela tomada de decisões, constituída por vários elementos geograficamente distribuídos mas que, necessitam partilhar informação, recursos e actividades de modo a atingir os objectivos comuns num ambiente geralmente incerto e dinâmico.

Song e Kleinman apresentam em [Song] um sistema, designado por DDD (*Distributed Dynamic Decisionmaking*), que permite simular os elementos essenciais dos problemas de tomada de decisões, com ênfase particular a nível de interacções e coordenação.

Trata-se de uma ferramenta de investigação e treino que permite realizar estudos científicos e, ao mesmo tempo, retém as características essenciais da tomada de decisões tácticas em ambientes reais.

O ambiente é configurável permitindo representar diferentes problemas, desde situações militares, a diagnóstico médico e escalonamento de tarefas em sistemas de manufactura.

O sistema é implementado numa rede de estações Unix, que permitem controlo em tempo real e aquisição de dados *on-line*. A sua interface gráfica, desenvolvida em X11/Motif, é bastante reconfigurável. Suporta equipas de tomada de decisão com cerca de sete elementos, com possibilidade expansão, distribuídos de forma hierárquica ou paralela.

O sistema de simulação DDD é bastante flexível de modo a permitir examinar vários problemas de processamento de informação e atribuição de recursos em diferentes organizações e estruturas de informação.

Numa sessão de simulação em tempo real, cada agente de tomada de decisões visualiza na sua estação de trabalho a situação táctica e recebe e envia informação de/para os outros agentes.

A tomada de decisões em equipa é formulada como o processo de atribuir recursos limitados a um conjunto de tarefas, num ambiente dinâmico e incerto.

Os elementos essenciais da tomada de decisões em equipa são:

- recursos: máquinas, sensores, armas, ...
- tarefas: operações a efectuar, aviões inimigos, ...
- informação: medidas de sensores, relatórios, ...
- responsabilidades: quem deve fazer o quê e em que altura.

A estrutura de responsabilidades pode ser alterada, podendo o controlo dos recursos ser transferido, durante a simulação, de um agente para outro, e sendo possível ao líder da equipa modificar a responsabilidade pelas tarefas. É também possível que as tarefas alterem a sua trajectória.

O sistema funciona numa rede de estações Unix, sendo a arquitectura geral representada na Fig. 3.6.

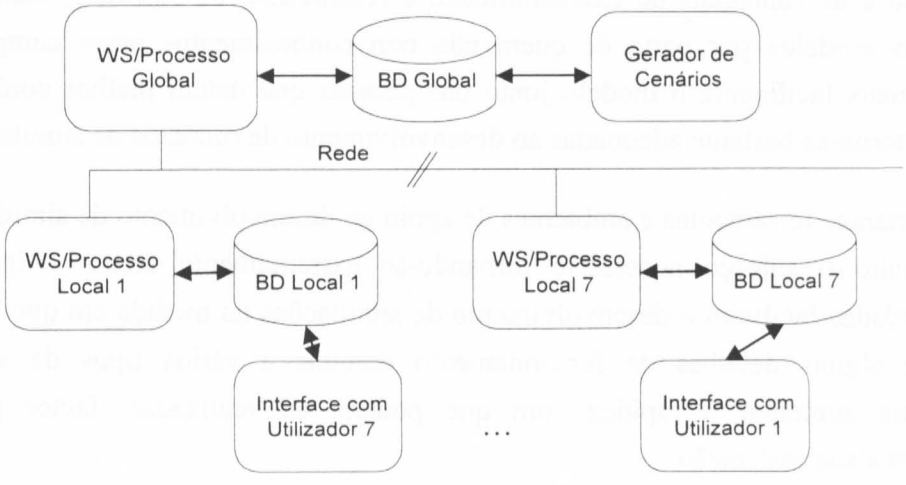


Fig. 3.6 - Arquitectura do sistema DDD

Existe um processo global (*Global process*) que funciona como unidade de controlo central, que controla o relógio da simulação e temporizações, sincronização de processos, e envia mensagens de controlo de acordo com o cenário experimental.

Cada processo local (*Local process*) controla a execução numa estação de trabalho, interage com a interface com o utilizador e o processo global.

A interface com o utilizador recebe comandos de um agente de tomada de decisões e ilustra a situação táctica dinâmica.

O gerador de cenários é usado para auxílio ao utilizador, permitindo-lhe configurar recursos, definir tarefas, e projectar a trajectória das tarefas.

3.9. Conclusões

A simulação é cada vez mais uma ferramenta indispensável na análise e auxílio à tomada de decisões em sistemas complexos, como os sistemas de produção, onde são diversos os aspectos a considerar e as fontes de incerteza e variabilidade.

Para que os resultados obtidos com um estudo de simulação sejam de confiança as suas várias fases devem ser alvo de uma cuidadosa análise e elaboração. Particularmente no que diz respeito à fase de modelização, que se revela extremamente crítica para a validade dos resultados, é muito importante ter sempre presente os objectivos da simulação e características do sistema.

As características das metodologias orientadas a objectos, como a organização da informação de modo hierárquico e as vantagens de extensibilidade e reutilização de *software*, além da fácil compreensão dos modelos por parte de quem não tem conhecimentos nesse campo, o que permite validar mais facilmente o modelo junto das pessoas que detêm melhor conhecimento sobre o sistema, torna-as bastante adequadas ao desenvolvimento de modelos de simulação.

Existem já importantes ferramentas e ambientes de apoio ao desenvolvimento de simulações que reduzem em muito o esforço necessário tornando-se extremamente úteis. Algumas das ferramentas abordadas facilitam o desenvolvimento de simulações na medida em que libertam o programador de alguns detalhes de funcionamento comuns a vários tipos de aplicações, contribuindo para aumentar a rapidez com que podem ser realizadas, factor por vezes determinante para a sua realização.

A nível da simulação de eventos discretos são várias as ferramentas disponíveis. Nomeadamente o Sim++, desenvolvido na Universidade da Florida, que além de ser muito flexível e ser desenvolvido seguindo uma metodologia orientada a objectos, com todas as vantagens inerentes, auxilia na realização de diversos tipos de simulação baseadas em modelos de filas de espera, como é o caso da simulação de linhas de fabrico, libertando o programador de detalhes de escalonamento, interrupção e organização dos eventos.

A participação dos futuros utilizadores ao longo de todo o processo de desenvolvimento da aplicação de simulação é vital para que os requisitos sejam cumpridos. A discussão dos modelos e o desenvolvimento de protótipos do sistema, ou parte dele, é determinante para que a aplicação cumpra os requisitos e objectivos da sua realização.

A análise efectuada permite a escolha do modelo e ferramentas de suporte apropriadas ao sistema em análise de acordo com a metodologia de simulação descrita.

Capítulo 4

Um Caso Prático

4.1. Introdução

Da análise de uma empresa do sector das confecções e discussão dos seus principais problemas surgiu a motivação para realizar um sistema informático destinado a auxiliar os responsáveis pela tomada de decisões a nível de planeamento e controlo da produção.

Pretende-se que seja um sistema com vários módulos integrados, de planeamento, monitorização e controlo da produção a implementar para auxílio à tomada de decisões, e para melhorar os rendimentos e controlo do sistema.

A elaboração de modelos de modo a clarificar e estruturar o futuro sistema são passos importantes a desenvolver.

Trata-se de uma empresa em que os principais problemas se encontram na secção de montagem, secção com forte componente de mão de obra, dada a dificuldade em lidar com toda a complexidade e variabilidade inerente às linhas de montagem manuais em que se encontra organizada. O problema de balanceamento das linhas é por isso um dos pontos em que urge melhorar o rendimento.

Com o desenvolvimento de um sistema que permita obter, testar e analisar, recorrendo a uma ferramenta de simulação, distintos balanceamentos, será possível avançar na resolução futura desse problema.

4.2. Descrição

A empresa em análise faz parte de um grupo multinacional, com sede noutro país e com vários centros produtivos espalhados pelo mundo entre os quais se inclui este no nosso país. O seu sector produtivo é o das confecções.

A empresa conta com cerca de 180 trabalhadores, e fabrica vários produtos (ou partes destes que depois são enviados para outro centro produtivo), entre os quais:

- ▷ Roupa interior de homem e senhora;
- ▷ Fatos de banho de homem e senhora;
- ▷ Roupa de acompanhamento de banho.

Tratam-se de produtos sujeitos a um elevado grau de sazonalidade, com grandes dispersões nas necessidades produtivas ao longo do ano (30% a 110% da capacidade total), que obriga a medidas que serão apresentadas posteriormente.

4.2.1.Organização

A empresa está organizada da seguinte forma:

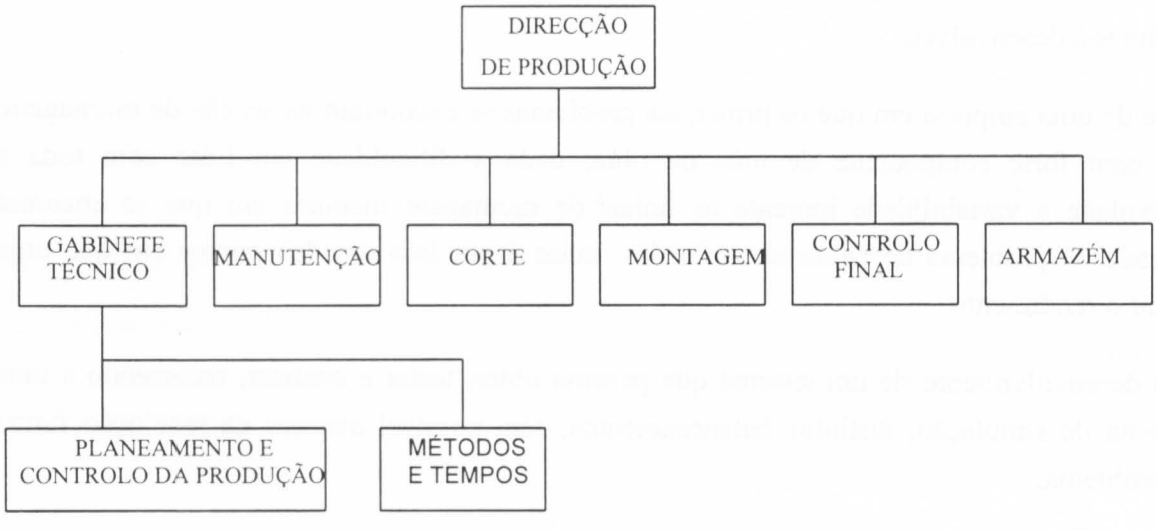


Fig. 4.1. - Organização

4.2.1.1.Direcção da produção

Da responsabilidade de um director de produção, que desempenha as funções a seguir mencionadas:

- ▷ Planeamento e escalonamento da produção;
- ▷ Balanceamento das linhas;
- ▷ Coordenação entre os diversos sectores;
- ▷ Chefia do gabinete técnico;
- ▷ Gestão da qualidade.

4.2.1.2.Gabinete técnico

Este gabinete tem como objectivos:

- ▷ Análise dos dados técnicos provenientes da sede;
- ▷ Verificação desses dados;
- ▷ Adaptação do processo operatório à configuração fabril e aos operários;
- ▷ Modificação da configuração fabril em casos pontuais;
- ▷ Apoio técnico relativo às operações necessárias.

4.2.1.3.Métodos e tempos

Para cada produto esta secção testa os tempos operatórios que constam dos dados técnicos e é feita a verificação de qual a melhor abordagem para cada uma das diversas operações.

Controlam e analisam os tempos realizados pelas operárias nas diferentes operações.

4.2.1.4.Planificação e controlo da produção

Esta secção distribui as várias ordens de fabrico pelas várias secções e pelas linhas de montagem, atribui as operárias aos postos de trabalho consoante a sua predisposição para as diversas operações (deduzida através da informação dos tempos de realização dessas mesmas operações).

4.2.1.5.Corte

A divisão de corte é responsável pelo corte das diferentes peças que constituem o produto final. Devido ao facto desta operação ser crítica em termos de qualidade do produto final, o controlo de qualidade é efectuado durante todas as operações de corte.

Esta operação é realizada tendo como um dos seus objectivos a minimização de desperdícios de matérias primas com auxílio computadorizado.

4.2.1.6.Montagem

Esta secção efectua a junção das diferentes peças provenientes da secção de corte. Tem adstrita 70 a 80% dos recursos humanos, pois são realizadas várias operações que necessitam de mão de obra intensiva.

Está estruturada em sete linhas. Cada linha tem entre dez a quinze operárias e uma chefe de linha que supervisiona a linha e transporta os produtos entre postos de trabalho. A supervisão consiste basicamente na verificação de anomalias no nível de *stocks* entre postos de trabalho e no controlo de qualidade local. É também responsável pela distribuição do trabalho na linha em conjunto com o chefe de métodos e tempos, uma vez que ao lidar directamente com as operárias, conhece melhor as suas capacidades.

Existe ainda um chefe de confecção que realiza a interface entre o director de produção, o gabinete técnico e as chefes de linha.

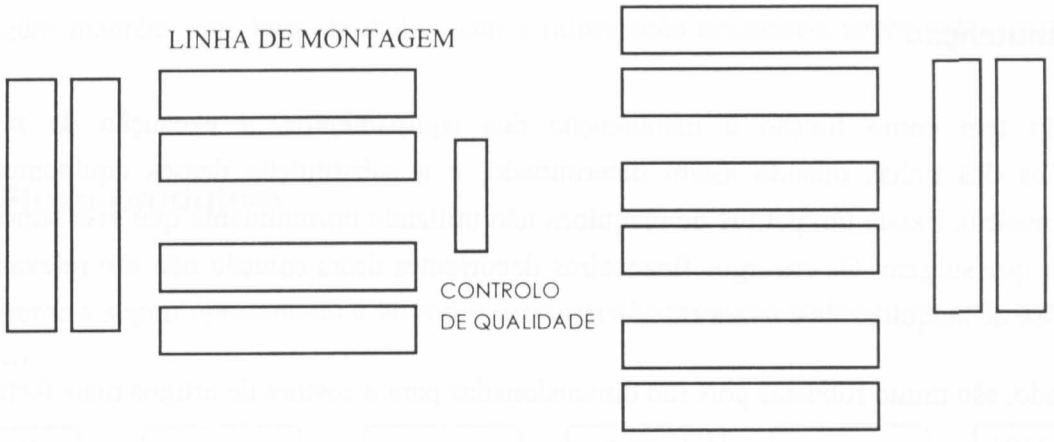


Fig. 4.2. - Configuração secção de montagem

4.2.1.6.1.Classificação das linhas de fabrico

São linhas de montagem manuais, que em cada instante estão dedicadas apenas à produção de apenas um tipo de produto. No entanto a necessidade de produzirem outro tipo de modelos ou produtos é frequente. São por isso linhas essencialmente multi-modelo.

São linhas complexas, na medida em que os tempos de serviço são extremamente variáveis e dependentes quer da variabilidade inerente ao comportamento humano, quer da variabilidade imposta pelas pequenas mudanças no fabrico que mesmo a produção do mesmo tipo de produto implica, nomeadamente quando há troca de côr ou tamanho.

Não recorrem a nenhum tipo de dispositivo mecânico para efectuar a deslocação de itens entre estações de trabalho, são por isso linhas não mecânicas.

As estações de trabalho da linha podem reter os itens até que o seu processamento nessa estação tenho sido completado passando-os só nessa altura à estação seguinte, portanto a situação é de tempo de ciclo variável, o fluxo de trabalho irregular ao longo da linha, e não são produzidos itens incompletos.

É possível que surjam tempos mortos devidos a estações com falta de trabalho.

4.2.1.7.Manutenção

Esta divisão tem como função a manutenção dos equipamentos, a execução de novas configurações das linhas quando assim determinado, e a substituição desses equipamentos quando necessário. Existe um parque de máquinas não utilizado normalmente que visa suprir as dificuldades que surgem. Os encargos financeiros decorrentes desta solução não são relevantes, pois tratam-se de máquinas de costura *standard*.

Por outro lado, são muito robustas pois são dimensionadas para a costura de artigos mais fortes.

É assumido que a substituição e manutenção dos equipamentos é feita sem perturbar a produção, ou seja, sem levar à ruptura dos *stocks* intermédios.

A manutenção é totalmente correctiva, não existindo manutenção escalonada ou preventiva.

4.2.1.8.Controlo final

Após a montagem é feito nesta secção o controlo final dos produtos, por inspecção visual, sendo este controlo bastante apertado (100%), uma vez que os produtos pretendem abastecer um segmento de mercado de topo.

Alguns produtos são experimentados em manequins, ou em alguns casos em pessoas. Este tipo de controlo é feito por amostragem.

4.2.1.9.Embalagem

Nesta secção realizam-se as operações de passagem a ferro e embalagem individual no caso de produtos acabados.

4.2.1.10.Armazém

Aqui é feita a armazenagem quer de matérias primas, quer de produtos acabados.

Quanto às matérias primas, o *stock* é mantido no mínimo possível (um a dois dias).

A chegada das matérias primas tem que ser acordada com a sede.

O armazém mantém uma base de dados com a informação necessária sobre todas as matérias primas.

4.2.2.Fluxo produtivo

No diagrama a seguir apresentado é visível o percurso dos produtos ao longo de todo o processo produtivo.

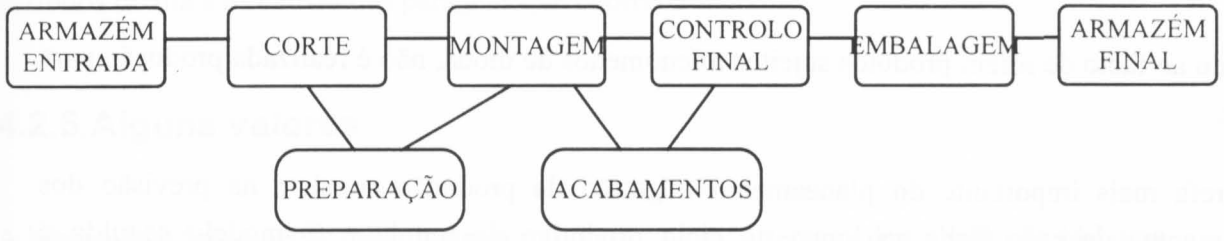


Fig.: 4.3. - Fluxo produtivo

O transporte entre as diversas divisões é efectuado manualmente. A chegada das matérias primas é acordada com a sede que efectua o controlo de qualidade das mesmas.

Estas matérias primas são cortadas de forma a minimizar os desperdícios. As diversas peças que posteriormente serão agregadas, devem ser cortadas a partir da mesma peça de tecido, por questões de uniformidade do produto final.

São então enviadas para as várias linhas de montagem, ou podem passar primeiramente por uma fase de preparação, geralmente subcontratada. A preparação consiste por exemplo num bordado num bolso.

Segue-se então a fase de montagem. O transporte dos lotes nas linhas de montagem, entre postos de trabalho é efectuado pelas chefes de linha, permitindo assim algum controlo de qualidade ao longo do processo de montagem. Os postos de trabalho são constituídos por uma ou mais máquinas de costura *standard*, e uma operária. A chefe de linha é responsável pela colocação dos acessórios necessários às diferentes operações nos postos de trabalho respectivos

Após a montagem dos produtos estes poderão sofrer uma fase de acabamentos, também normalmente subcontratada, ou passar directamente à fase de controlo de qualidade final.

Depois de operações subcontratadas é realizado um controlo de qualidade. Estas operações são subcontratadas pois são essencialmente manuais e devido às suas características podem provocar gargalos no processo.

Os produtos, saindo do controlo final passam por uma fase de passagem a ferro, sendo posteriormente embalados, e armazenados.

4.2.3.Planeamento e Gestão da Produção

Devido ao facto de serem produtos sujeitos a fenómenos de moda, não é realizada produção para *stock*.

A tarefa mais importante do planeamento e gestão da produção consiste na previsão dos rendimentos de cada linha ao longo do ciclo produtivo de um lote. O modelo seguido é extrapolado das curvas de aprendizagem que geralmente se encontram associadas a cada operária relativamente às operações realizadas. Assim é encontrada uma curva de aprendizagem global para a linha correspondendo a um lote de um determinado produto. A curva é matematicamente descrita pela seguinte equação:

$$Y = Yi + (Yf-Yi)\,(\,1 - e^{-t/\zeta}\,) \qquad (4.1)$$

em que Yi = rendimento inicial e Yf = rendimento final.

Estes rendimentos e a constante de tempo são estimados tendo em conta os valores históricos, a complexidade do produto em questão e as características da linha e das suas operárias.

A correlação entre as curvas reais e teóricas é bastante boa, a não ser nas zonas de transição para um produto diferente, em que os pressupostos do modelo adoptado não são aplicáveis. Por exemplo, o modelo assume que o equilíbrio da linha é estável, não existindo rupturas de *stocks* intermédios, o que se verifica aquando da mudança de produto.

Geralmente devidas a:

- Falha de abastecimento de matérias primas;
- Avaria de equipamento;
- Absentismo;

- Falhas de energia.

A previsão para um dado período (uma semana) é então compilada numa folha de cálculo.

4.2.4.Controlo da Produção

Cada operária tem de preencher uma ficha diária onde indica quantas peças fez em quatro períodos do dia e as causas das paragens que ocorrerem.

4.2.5.Alguns valores

A laboração é feita apenas durante um turno diário, sendo a semana de trabalho de 44 horas.

A ocupação de capacidade é extremamente variável atendendo à sazonalidade dos produtos, variando entre 30 e 110%. A adaptação a estes valores tão díspares é conseguida através de:

- flexibilização dos horários;
- períodos de paragem total;
- subcontratação acrescida;
- horas extras.

O grau de automatização, como se pode deduzir a partir da descrição feita, é praticamente nulo, já que dada a natureza das operações a automatização não se torna rentável.

O rendimento do ano de 1995 situou-se em 72,5%, sendo o objectivo inicial para esse ano de cerca de 77,5 a 80%.

As perdas são essencialmente devidas a:

- Absentismo;
- Ruptura de *stock*s externas;
- Perdas acidentais;
- Problemas mecânicos;

- ▷ Tempos de setup que são considerados nulos;
- ▷ Tempo de transporte;
- ▷ Fase de aprendizagem e adaptação a novos produtos.

A flexibilidade é extremamente elevada devido à possibilidade de mudança da configuração fabril, da transferência de operárias entre postos de trabalho e linhas de montagem. Todos os equipamentos da secção de montagem são adequados às diversas operações devido à sua polivalência e natureza das operações.

4.2.6.Fluxo de informação

Para a distribuição das ordens de fabrico pelos diferentes centros produtivos, os mesmos enviam um relatório semanal sobre o seu estado actual.

A sede envia as ordens de fabrico do produto com a respectiva data final. Como já foi referido, a sede é responsável por todo o desenho e projecto do produto.

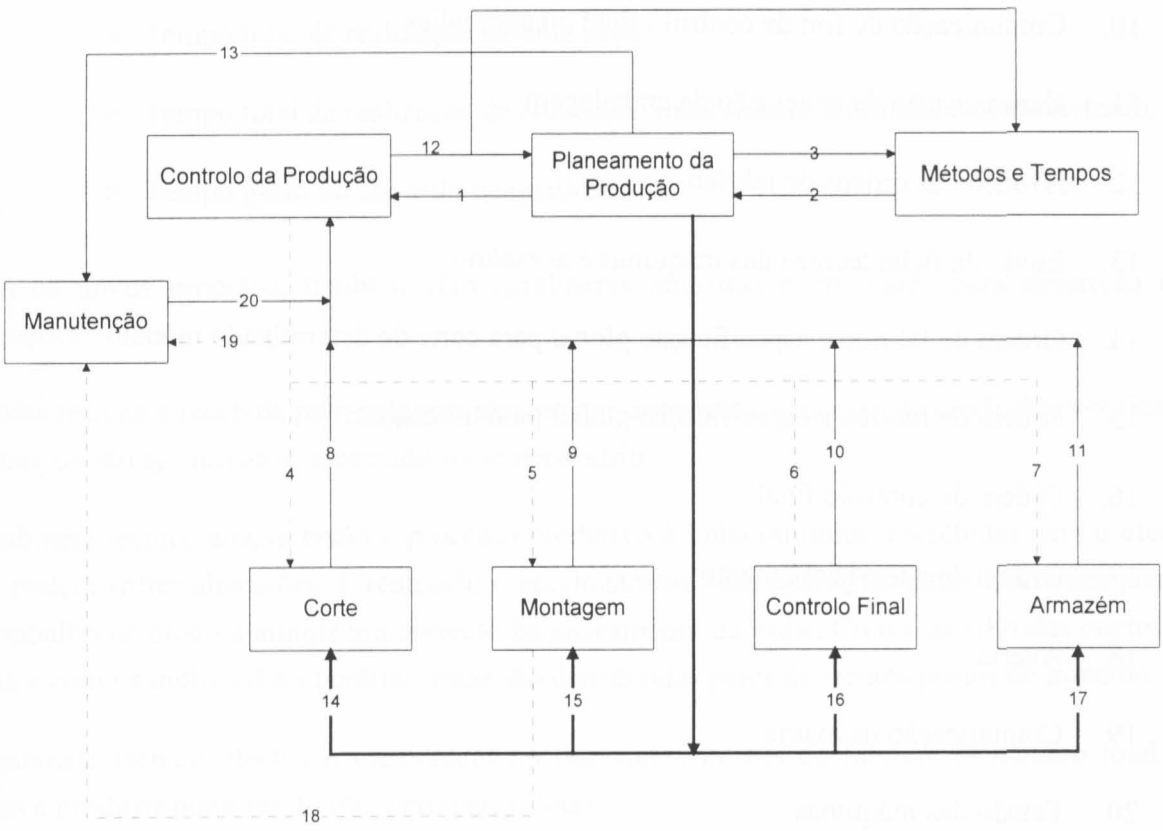


Fig: 4.4. - Fluxo de informação

Os principais fluxos de informação encontram-se descritos na Fig. 4.4. Apresenta-se a seguir uma breve descrição:

1. Envio do planeamento e ordens de fabrico
2. Definição do processo operatório e configuração fabril
3. Envio da ficha técnica
4. Requisição de peças cortadas
5. Requisição de montagem
6. Requisição de controlo final
7. Requisição de embalagem
8. Comunicação de fim de corte ou anomalias
9. Comunicação de fim de montagem ou anomalias

10. Comunicação de fim de controlo final ou anomalias
11. Comunicação de conclusão da embalagem
12. Avanço das ordens de fabrico
13. Envio da ficha técnica das máquinas e acessórios
14. Ordem de fabrico e especificação global para corte de determinado modelo
15. Ordem de fabrico e especificação global para montagem
16. Ordem de controlo final
17. Ordem de aprovisionamento
18. Avaria
19. Comunicação de avaria
20. Estado das máquinas

A informação sobre os novos produtos é sumariada na ficha técnica que é traduzida para português (exemplo no anexo 0), que inclui os seguintes itens:

- ▷ Nº de minutos trabalhados por dia;
- ▷ Nº de operárias previstas;
- ▷ Produção prevista por dia;
- ▷ Tempo de produção de uma peça por operária;
- ▷ Código das operações;
- ▷ Descrição das operações;
- ▷ Máquinas e acessórios necessário para cada operação;
- ▷ Tempos de realização de cada operação;
- ▷ Nº de vezes que a operação é realizada da parte da manhã e da tarde;
- ▷ Nº de minutos gastos por dia em cada operação;

- ▷ Tempo total de realização de uma peça;
- ▷ Tempo total de realização de confecção mais remate, estimado e cronometrado;
- ▷ Tempo gasto no controlo de qualidade.

Com os novos produtos, também vêm geralmente amostras e um vídeo para descrição das operações.

A ficha técnica é recebida pelo gabinete técnico que apreende o processo de produção, verifica se os tempos são apropriados, ajustando-os se necessário.

O gabinete técnico adapta então o processo produtivo à linha ou linhas escolhidas para o efeito, que podem sofrer alterações. É realizado o escalonamento das operações pelos diferentes postos de trabalho de modo a atingir um correcto balanceamento da linha. Com o auxílio das chefes de linha e com os índices das operárias, estas são distribuídas pelos diferentes postos de trabalho.

O gabinete técnico efectua o escalonamento das várias ordens de fabrico. O número total de peças a produzir pode ser dividido em vários lotes.

Os lotes em média rondam as 200 a 300 unidades, o que é provocado pelas tendências de diferenciação e diversificação do mercado.

Cada lote é acompanhado por uma etiqueta com a sua identificação, ao longo do processo.

A chefe de linha transmite antecipadamente às operárias as operações que têm que realizar. Cada operária regista numa folha as tarefas feitas ao longo do dia, com os tempos de processamento respectivos, que é depois analisada pela secção de métodos e tempos de modo a calcular os índices associados às operárias.

4.3. Sistema informático a desenvolver

Apesar da evolução positiva da empresa desde a sua formação os seus dirigentes sentem que para manter as vantagens competitivas devem intervir nos principais sectores produtivos de forma a melhorar os resultados em:

- ▷ Produtividade;
- ▷ Flexibilidade;

- ▷ Qualidade;
- ▷ Serviço.

A introdução de uma ferramenta de apoio à decisão com recurso às novas tecnologias da informação permitirá:

- ▷ melhorar a produtividade da empresa através de ganhos em eficiência e redução de perdas acidentais;
- ▷ melhorar o serviço prestado a clientes com a redução de tempos de trânsito e maior precisão em prazos de entrega;
- ▷ libertar os quadros técnicos de actividades manuais de gestão da informação e controlo de produção, para actividades na área da qualidade e melhoria dos processos produtivos.

As principais áreas de intervenção serão a nível de:

- ▷ planeamento agregado da produção;
- ▷ balanceamento das linhas de montagem;
- ▷ simulação;
- ▷ monitorização e controlo;
- ▷ estruturação da informação.

Abordam-se em seguida cada um dos pontos descritos.

4.3.1.Planeamento da Produção

4.3.1.1.Principais problemas

É a este nível que são geradas algumas das mais importantes perdas para a empresa. A incorrecta distribuição das ordens de fabrico pela capacidade produtiva existente traduz-se normalmente em perdas de rendimento provocadas pelas curvas de aprendizagem e tempos de preparação (tempos

de *setup*). A incorrecta avaliação e controlo de recursos de fabrico impõe em muitos casos *stocks* intermédios elevados, com consequências a nível de custos e tempos de trânsito, ou rupturas originando perdas irreversíveis. A complexidade da tarefa e o não domínio de todas as variáveis envolvidas aumentam a inércia do sistema com redução da flexibilidade da empresa.

4.3.1.2.Objectivos

Com este módulo pretende-se distribuir todo o trabalho e a capacidade (mão de obra) pelas várias secções, e avaliar, com recurso à simulação, como irá evoluir o comportamento da empresa em termos de *stocks* acumulados ou possíveis rupturas a evitar.

É necessário analisar globalmente a empresa, a sua capacidade produtiva e sugerir datas de início de produção das diferentes Ordens de Fabrico, de modo a rentabilizar a sua produção e cumprir as suas datas de entrega.

Para se obter um planeamento da produção que efectivamente abranja todo o processo produtivo, é importante encapsular as particularidades de cada secção, modelizando-as por uma função de transferência parametrizável.

Dada a organização da secção de montagem em linhas, e visto tratar-se do ponto onde se podem atingir maiores ganhos de produtividade minimizando os problemas decorrentes da aprendizagem e modificação das linhas, torna-se relevante tratar esta secção de modo mais pormenorizado do que as restantes. Para tal será necessário considerar algumas das características de cada linha, para além da sua função de transferência, como a afinidade de cada uma com as famílias de produtos, a capacidade e o rendimento.

A este nível são tomadas decisões acerca da distribuição e sequenciamento das Ordens de Fabrico pelas linhas, função da afinidade de cada linha com o tipo de produtos a produzir, da quantidade de trabalho que têm de realizar e rendimentos que se conseguem atingir, com objectivo de assegurar o cumprimento das datas de entrega e atingir a melhor taxa produtiva possível.

4.3.1.3.Principais funcionalidades e linhas de acção

Os critérios a considerar para efectuar o planeamento serão:

- minimizar a soma pesada dos atrasos das Ordens de Fabrico;

- ▷ minimizar os tempos de aprendizagem (maximizar rendimento), distribuindo o trabalho tendo em atenção o realizado anteriormente em cada linha, para deste modo aproveitar a aprendizagem anterior;
- ▷ minimizar os tempos de preparação (evitar alterações desnecessárias da configuração das linhas);
- ▷ minimizar os *stocks* intermédios;

tendo como restrições as datas de entrega acordadas com os clientes e a capacidade produtiva.

Um dos pontos a analisar para minimizar as modificações da configuração fabril, os tempos de preparação e aprendizagem, é a análise de cada uma das linhas e a associação de um tipo ou família de produtos a cada uma delas, de modo a especializar a sua produção.

O algoritmo de planeamento da produção incidirá na distribuição das Ordens de Fabrico pelas linhas de montagem, sendo depois efectuado um *backward planning* para as secções a montante e *forward planning* nas secções a jusante. Para tal, é determinante a obtenção das funções de transferência das várias secções, o que introduz mais um grau de complexidade.

A integração com o módulo de monitorização e controlo permitirá uma actualização permanente do planeamento, de modo a haver sempre uma visão actualizada da produção, e avaliar a diferença entre o desempenho corrente e o esperado do sistema.

Deste modo será possível detectar, por exemplo, que uma linha teve problemas e não consegue por isso cumprir o plano de produção estabelecido. Sendo então possível efectuar novo planeamento de modo a deslocar atempadamente a produção que estava atribuída a essa linha, e que não vai poder ser concluída dentro do prazo estabelecido, para outra linha.

A nível de planeamento da produção, a simulação torna-se uma ferramenta extremamente útil ao permitir ao operador testar vários cenários possíveis, testar a sensibilidade dos mesmos a perturbações esperadas ou relevantes e avaliá-los sob o ponto de vista da utilização de recursos no tempo.

O módulo de simulação ao fornecer ao operador para cada solução possível informação quantitativa e qualitativa facilita o processo de decisão.

4.3.1.4.Requisitos de informação

O planeamento compreende várias tarefas, em que na fase de projecto será necessário identificar os requisitos de informação, nomeadamente em termos de estimar a capacidade de cada secção, parâmetros das ordens de fabrico, caracterização detalhada dos produtos e recursos envolvidos.

Será importante estabelecer regras de correlação produto/linha e depois determinar um algoritmo que permita conjugar as opções tomadas para cada secção de modo a atingir melhores rendimentos a nível local e global. Como restrições têm-se as disponibilidades de recursos e de *stocks* de matérias primas.

A nível de dados de entrada, será necessário construir diagramas de sequência de operações/recursos envolvidos e de constituição/matérias primas para cada produto, o que permitirá ao longo do processo fazer verificações em termos de utilização de recursos e necessidades de matéria primas.

4.3.2.Balanceamento das linhas de montagem

4.3.2.1.Principais problemas

A secção mais crítica é a montagem dada a concentração de cerca de 70 a 80% dos recursos humanos. Se através de um correcto planeamento se podem estabelecer condições para o melhor desempenho desta secção, só através de balanceamentos optimizados para as várias linhas de montagem se podem garantir, melhorias significativas de rendimento, redução de perdas eventuais, redução de *stocks* intermédios e minimização de tempos de trânsito.

Actualmente o escalonamento nesta secção é realizado pelas chefes de linha, agentes de métodos e tempos e chefe de secção, resultado do conhecimento adquirido ao longo do tempo e de dados históricos recolhidos.

Os factores relacionados com o produto tais como a variabilidade, complexidade e a fragmentação das ordens de fabrico aliadas a um grau de irregularidade imposto pela forte presença do factor humano nesta secção, aumentam grandemente a dificuldade de estabelecimento de soluções optimizadas.

A complexidade desta secção reside no facto do número de variáveis ser extenso, e na extrema flexibilidade da configuração fabril dada a simplicidade em alterar a topologia dos postos de trabalho. Variáveis a ter em consideração serão os índices das operárias face às operações, as curvas de aprendizagem, os tempos de realização das operações, o número de máquinas e operações por posto de trabalho, o tempo de trânsito das peças, e os níveis máximo e mínimo de *stock*s intermédios.

4.3.2.2.Objectivos

O balanceamento engloba a definição dos postos de trabalho e a distribuição das operárias por esses postos, tendo em conta os índices destas em relação às operações que irão ter que efectuar e as suas curvas de aprendizagem.

Os índices de desempenho reflectem o rendimento, os níveis de absentismo, a predisposição à realização de determinada operação e a configuração final do posto de trabalho. Estes índices, numa primeira fase serão obtidos a partir do conhecimento que as chefes de linha detêm sobre cada operária. Depois de implementado o módulo de monitorização será possível recolher sistematicamente os tempos de trabalho realizados pelas operárias, e realizar automaticamente registos históricos do seu desempenho.

4.3.2.3.Principais funcionalidades e linhas de acção

O balanceamento das linhas terá como critérios:

- maximizar do rendimento, grandemente afectado por factores de aprendizagem;
- a minimização dos fluxos e refluxos envolvidos, dado o aumento de tempo de trânsito que implica;
- a minimização das alterações da configuração fabril;
- a sensibilidade a irregularidades.

O desenvolvimento de um módulo de balanceamento de linhas flexível em que, seja possível ao utilizador definir diferentes pesos para os vários critérios, levará à obtenção de diferentes equilíbrios da linha mais adaptados à situação em questão.

O projecto de balanceamento das linhas de montagem engloba:

- ▷ a análise e avaliação do desempenho de algoritmos clássicos de balanceamento de linhas, como o "Método de Kilbridge e Wester" , o "Método dos pesos posicionais" e outros já abordados no Capítulo 2;
- ▷ a adaptação destes algoritmos ao caso concreto, tendo em atenção as particularidades deste tipo de linhas;
- ▷ o estudo da possibilidade de simplificar o modo de funcionamento actual das linhas, por exemplo a tentativa de eliminação de refluxos ao longo da linha, que se revelam problemáticos nomeadamente nas zonas de transição.

Uma abordagem para o funcionamento deste módulo será:

- ▷ obter balanceamentos recorrendo a métodos de balanceamento para um dado tempo de ciclo, registando o melhor ou os melhores;
- ▷ utilizar, em seguida, métodos de balanceamento de linhas dado o número de estações de trabalho pretendidas, de modo a minimizar as transformações na configuração, isto se o produto a realizar na linha for do mesmo tipo dos anteriores (pois só neste caso faz sentido manter as estações de trabalho anteriores), registando-se também o melhor ou os melhores;
- ▷ análise recorrendo ao módulo de simulação das soluções obtidas nos passos anteriores, o que permitirá ao utilizador concluir das vantagens de cada uma e seleccionar a melhor a implementar na prática, podendo alterar parcialmente ou mesmo completamente as soluções e testar outras que entender relevantes;
- ▷ atribuir operárias às soluções seleccionadas pelo utilizador de entre aquelas obtidas anteriormente e voltar ao passo anterior, para determinar a que melhor se comporta face à variabilidade introduzida pelo rendimento e curvas de aprendizagem de cada operária. Um dos critérios a ter em linha de conta é distribuir as operárias com maior variabilidade para o fim da linha.

Poderá também recorrer-se a algoritmos de pesquisa local, por exemplo do género *Tabu Search* ou *Simulated Annealing* para, através da troca de operações ou operárias entre postos de trabalho, se tentar encontrar uma solução mais adequada.

4.3.2.4.Requisitos de informação

O módulo de balanceamento das linhas de fabrico necessita de informação relativa a:

- ▷ operações, e respectivos tempos de realização;
- ▷ recursos envolvidos no fabrico de cada produto;

de modo a saber quais as operações a realizar e de que tipo são, quais os equipamentos de que necessitam e respectivas restrições de vizinhança. Resulta daí a necessidade em aceder a diagramas de sequência de operações/recursos envolvidos e de constituição/matérias primas para cada produto

Para que as operárias sejam distribuídas pelas postos de trabalho de modo a rentabilizar ao máximo as suas aptidões, quer em termos de minimização dos períodos de aprendizagem, quer em termos das suas qualificações ou predisposição à realização de determinado tipo de operações, torna-se necessário organizar a informação já existente e o conhecimento que as chefes de linha detêm de modo a determinar:

- ▷ os índices das operárias face às operações;
- ▷ as curvas de aprendizagem;
- ▷ os níveis de absentismo.

Alguns dos dados que são também indispensáveis para efectuar o balanceamento são as restrições a nível do número máximo aconselhável de máquinas e operações por posto de trabalho, e os níveis máximo e mínimo de *stocks* intermédios. Valores esses que só podem ser obtidos através do conhecimento que os quadros superiores e chefes de linha foram adquirindo ao longo dos vários períodos de funcionamento.

4.3.3.Simulação

Em sistemas complexos e em que a colocação em prática de soluções pouco eficientes se possam revelar demasiado dispendiosas e penalizantes torna-se imperioso o recurso à simulação.

Se nos módulos descritos anteriormente se pretende encontrar e avaliar soluções iniciais a partir de modelos pré-definidos, a utilização de simuladores da actividade fabril permitirá fazer a verificação detalhada no tempo das soluções encontradas, analisar cenários alternativos e avaliar

os resultados esperados. O módulo de simulação ao gerar informação que permita ao utilizador a detecção e prevenção de possíveis anomalias possibilita o funcionamento proactivo do sistema.

O módulo de simulação terá que ser suficientemente flexível de modo a ser possível efectuar simulações a nível de planeamento da produção e balanceamento das linhas de fabrico, apresentando cada um dos casos funcionalidades diferentes.

A interligação entre a monitorização e a simulação permitirá o levantamento da configuração implementada na prática e a avaliação da sua evolução, o que pode ser importante na detecção das anomalias e correcção das mesmas, permitindo o funcionamento proactivo do sistema.

4.3.3.1.Planeamento da Produção

Em termos de planeamento agregado pretende-se avaliar:

- a distribuição da capacidade das secções;
- o comportamento dos *stocks* intermédios;
- o fluxo de trabalho;
- a utilização de recursos no tempo.

Como já foi referido, pretende-se que o módulo de simulação permita ao operador testar vários cenários fornecendo-lhe, para cada solução possível, informação quantitativa e qualitativa, com o objectivo de facilitar o processo de decisão. O tipo de informação que se pretende obter, no caso do planeamento da produção, é a possibilidade de exceder a capacidade produtiva, a acumulação de *stock*s entre as várias secções, se existe possibilidade de as datas de entrega não serem cumpridas e a sensibilidade a avarias de equipamento ou deslocação de operárias entre as secções.

4.3.3.2.Balanceamento das linhas de fabrico

No entanto, onde a simulação se irá revelar mais vantajosa será nas linhas de montagem, pelas características já abordadas. A este nível pretende-se:

- avaliar as configurações dos postos de trabalho;

- ▷ analisar a sensibilidade do balanceamento a perturbações do rendimento, e ao absentismo não programado;
- ▷ a sensibilidade a pontos críticos;
- ▷ a sensibilidade a avarias do equipamento;
- ▷ avaliar os níveis de *stocks* entre postos de trabalho;
- ▷ analisar o comportamento das linhas durante os períodos de transição.

Todas estas características analisadas durante a simulação do funcionamento das linhas de fabrico ao longo do tempo permitem ao utilizador avaliar as várias opções e fundamentar a tomada de decisões, para que o risco de surgirem problemas seja o menor possível.

Nunca é demais referir que só com modelos válidos e uma simulação adequada será possível a confiança nos seus resultados. Daí a extrema importância que detém o desenvolvimento do módulo de simulação.

4.3.3.3.Modelos

Os modelos serão desenvolvidos seguindo uma abordagem orientada a objectos.

Em sistemas de grande dimensão e complexidade torna-se extremamente difícil conseguir determinar logo à partida todas as funcionalidades que se pretendem. As características de extensibilidade e reutilização de software, inerentes às metodologias orientadas a objectos, tornam-se nestes casos muito importantes e vantajosas. Além disso, a rapidez de desenvolvimento de simulações, por vezes factor crítico para a sua realização e para auxílio à tomada de decisões, é aumentada com a possibilidade de completar e reutilizar os modelos à medida que se vai adquirindo conhecimento sobre o sistema e em caso de necessidade de alterações futuras.

Também a dificuldade em dialogar com os utilizadores pode ser minimizada recorrendo a modelos orientados ao objecto, dada a fácil compreensão com que rapidamente pessoas sem conhecimentos técnicos no domínio da modelização conseguem atingir, o que permite clarificar muito mais rapidamente todos os requisitos impostos pelos futuros utilizadores do sistema. Por outro lado a melhor comunicação entre as pessoas é muito importante para a obtenção de modelos válidos.

A organização da informação de modo hierárquico e a propriedade de hereditariedade, características destas metodologias, permite a elaboração de modelos mais fáceis de verificar e facilita a organização do conhecimento sobre o sistema, tão mais importante quanto maior a complexidade dos sistemas envolvidos.

Algumas das vantagens apontadas e justificativas da utilização de metodologias de modelização orientada ao objecto foram já sentidas na prática durante a realização dos modelos do sistema global e do sistema desenvolvido, nomeadamente no que se refere à fácil extensibilidade e diálogo com os intervenientes.

4.3.3.4.Tipo de simulação

O tipo de simulação a utilizar será uma simulação de eventos discretos, porque o que é determinante neste caso é a modificação do estado do sistema face à ocorrência de determinados acontecimentos. Alguns dos eventos determinantes no desenrolar do funcionamento são, por exemplo, a nível de planeamento:

- conclusão do fabrico de uma Ordem de Fabrico numa linha;
- paragem de uma linha ou posto por qualquer motivo;
- conclusão do processamento de um lote em qualquer uma das secções.
- a nível de balanceamento:
- o término de processamento de um lote num posto de trabalho;
- a avaria de uma máquina;
- a indisponibilidade de uma operária.

Estes são apenas alguns dos eventos, ou acontecimentos, que causam modificações no sistema. No entanto, durante o desenvolvimento da simulação, e dependendo do modo como esta vai ser construída, poderão tornar-se necessários outro tipo de eventos, como por exemplo um evento que determine o fim da simulação, e outros poderão até tornar-se redundantes e por isso desnecessários. Tal só poderá ser determinado durante o desenvolvimento do módulo de simulação, através de uma análise cuidadosa do tipo de situações que acontecem na realidade e do modo como irão ser representadas.

Relativamente à simulação do balanceamento das linhas de montagem durante a realização do sistema apresentado na secção 4.5 foram já determinados quais os eventos necessários.

4.3.4. Monitorização e Controlo

A obtenção de informação fiável quanto aos tempos de produção torna-se indispensável com vista à organização de dados históricos necessários ao planeamento e escalonamento da produção. Por outro lado, o seu acompanhamento em tempo real permitirá detectar mais rapidamente o aparecimento de problemas tornando-se possível reagir antes que se possam propagar a outros sectores. A redução da carga burocrática actual, com menos influências da subjectividade inerente à obtenção desses dados a partir dos recursos humanos são mais algumas das vantagens deste módulo.

O registo dos tempos por operação, tempos de espera em *buffers* intermédios, níveis de *stocks*, absentismo, quebras de rendimento, permitirão obter registos históricos e efectuar medidas correctivas. Por outro lado, o facto de facilitar a rastreabilidade do produto é extremamente importante para a detecção das causas de defeitos na qualidade.

A inclusão de um sistema de mensagens de erro direccionadas aos responsáveis das diversas áreas fabris graduadas em níveis da gravidade do erro detectado, também pode assumir um papel importante na reacção proactiva do sistema.

Outra medida a ser tomada com base na informação recolhida será a sinalização para as operárias do desempenho atitingido, o que poderá funcionar como incentivo a aumentarem o seu rendimento.

Os níveis dos armazéns intermédios podem ser controlados e a capacidade limitada através de sinalização adequada para a operadora, indicando-lhe se deve ou não continuar a produzir, mediante a quantidade de itens no armazém entre a estação em que se encontra e a estação para onde envia os itens produzidos.

A recolha de dados de modo automático permitirá obter dados mais fiáveis e curvas de rendimentos mais rigorosas uma vez que, a influência de em determinado instante as operárias se sentirem observadas pelo agente de métodos e tempos ou pela chefe de linha, com consequente alteração do seu ritmo de produção, deixa de existir. Além disso, a dependência em relação ao conhecimento que as chefes de linha detêm é minimizada e, depois de um período inicial de arranque do sistema torna-se mesmo desnecessária.

Os terminais de recolha de dados a utilizar, de modo a permitirem obter os dados sem haver perturbação do desempenho das operárias, serão do tipo código de barras, sendo necessário analisar qual dos diferentes tipos será o mais adequado a aplicar na prática.

A avaliação do tipo de configuração a utilizar, concentrador (topologia em estrela com várias ligações ponto a ponto) ou rede de campo (topologia tipo *bus* ou *ring*), será um ponto importante do projecto deste módulo.

Prevê-se a disponibilização de informação *on line* para a chefe de linha, que assim poderá observar no PC, através de uma interface agradável o evoluir dos lotes ao longo da linha, com sinalização dos rendimentos que estão a ser obtidos nos diferentes postos de trabalho, dos níveis de *stocks* e avarias ou anomalias que possam surgir no decorrer da actividade.

4.3.5.Conclusões

Dado o grande número de decisões envolvidas justifica-se a hierarquização do sistema de apoio. Serão considerados dois níveis que correspondem basicamente aos dois primeiros itens focados anteriormente.

A um nível mais global, que abrange todo o processo produtivo, é efectuado o planeamento das ordens de fabrico, abstraindo-se das particularidades de cada secção. A um nível restrito considerar-se-ão as particularidades das secções com especial incidência na montagem, pela quantidade de mão-de-obra envolvida.

A simulação pretende-se que seja utilizada em ambos os níveis, planeamento e balanceamento, como ferramenta indispensável à análise de cenários e à escolha da melhor opção a implementar na prática, prevendo-se ainda que venha a permitir exercer um controlo proactivo do sistema.

A monitorização é fundamental à recolha de toda a informação necessária e actualizada, imprescindível para realizar controlo do sistema com dados reais e registar valores para constituição de históricos indispensáveis a futuros planeamentos e balanceamentos.

Um dos pontos fortes do sistema que se pretende desenvolver é a integração entre as aplicações destinadas à monitorização e controlo, planeamento, escalonamento da produção e módulo de simulação.

Extremamente importante para o sucesso do sistema e de qualquer um dos módulos, é o desenvolvimento de interfaces agradáveis e amigáveis ao utilizador. Para que tal seja conseguido,

o acompanhamento do desenvolvimento do sistema por parte dos utilizadores e o desenvolvimento de protótipos que eles possam experimentar, de modo a clarificar bem quais as suas necessidades e dificuldades, é essencial.

Todos estes pontos foram alvo de uma análise cuidada, com vista à determinação dos problemas a resolver e dos objectivos, funcionalidades, linhas de acção e requisitos de informação de cada módulo.

Foi desenvolvido um modelo do sistema utilizando uma metodologia orientada a objectos, que tem como grandes vantagens a introdução de conceitos como herança, encapsulamento, que facilita a estruturação do conhecimento, e a expansibilidade ou modificações que possam ser necessárias, que servirá como ponto de partida ao futuro desenvolvimento do sistema.

Um sistema de parte do sistema foi também desenvolvido, para permitir uma primeira abordagem aos problemas e para servir como ponto de partida ao módulo de balanceamento e simulação das linhas de montagem.

Descrevem-se em seguida os modelos e sistema desenvolvidos.

4.4. Modelo do Sistema

Fundamental para o sucesso de qualquer sistema informático é a análise cuidada dos seus requisitos e características, e a elaboração de modelos que os sintetizem e sirvam de ponto de partida.

As características das metodologias orientadas a objectos torna-as bastante adequadas. A organização da informação de modo hierárquico permite a elaboração de modelos mais fáceis de verificar e facilita a organização do conhecimento sobre o sistema. As vantagens de extensibilidade e reutilização de *software* permitem completar os modelos quando seja necessário alargar os campos abrangidos e facilitar alterações futuras. Permitem também identificar mais facilmente os requisitos do sistema, na medida em que são de fácil compreensão.

Após uma análise de estudos desenvolvidos por Hong e Berard, [Hong, 93] e [Berard, 93], que caracterizam e comparam várias metodologias de modelização orientadas a objectos optou-se por utilizar a metodologia proposta por Rumbaugh, a "Object Modelling Technique". Uma vez que se verificou ser uma das melhores colocadas em relação aos critérios de avaliação utilizados. Por outro lado a existência de ferramentas que permitem a elaboração dos seus modelos e o facto de já existir experiência na sua utilização foram também factores de peso na sua selecção.

Apresentam-se em seguida os modelos elaborados.

4.4.1.Modelco de Objectos



Fig. 4.5 - Primeira vista do modelo de objectos

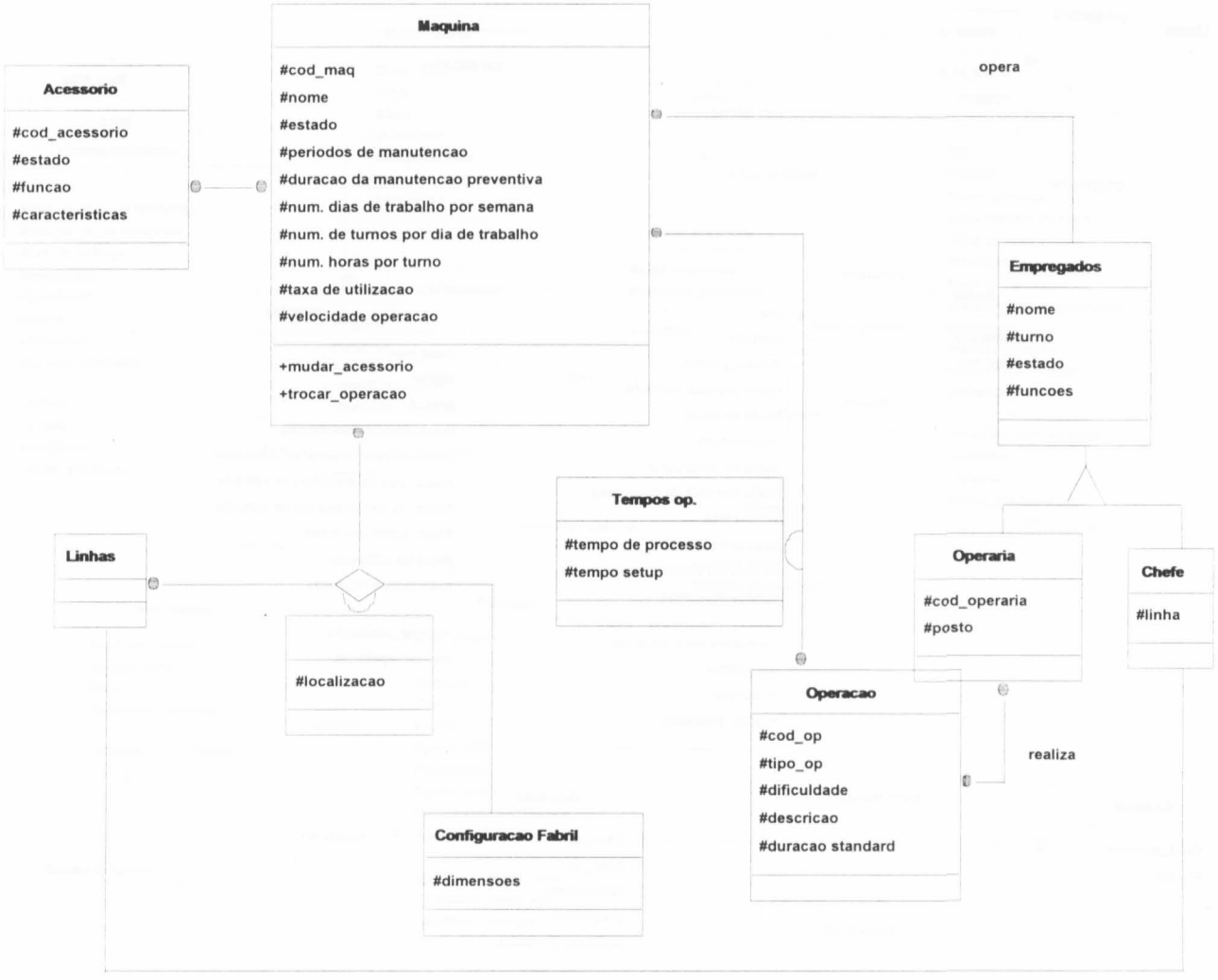


Fig. 4.6 - Segunda vista do modelo de objectos

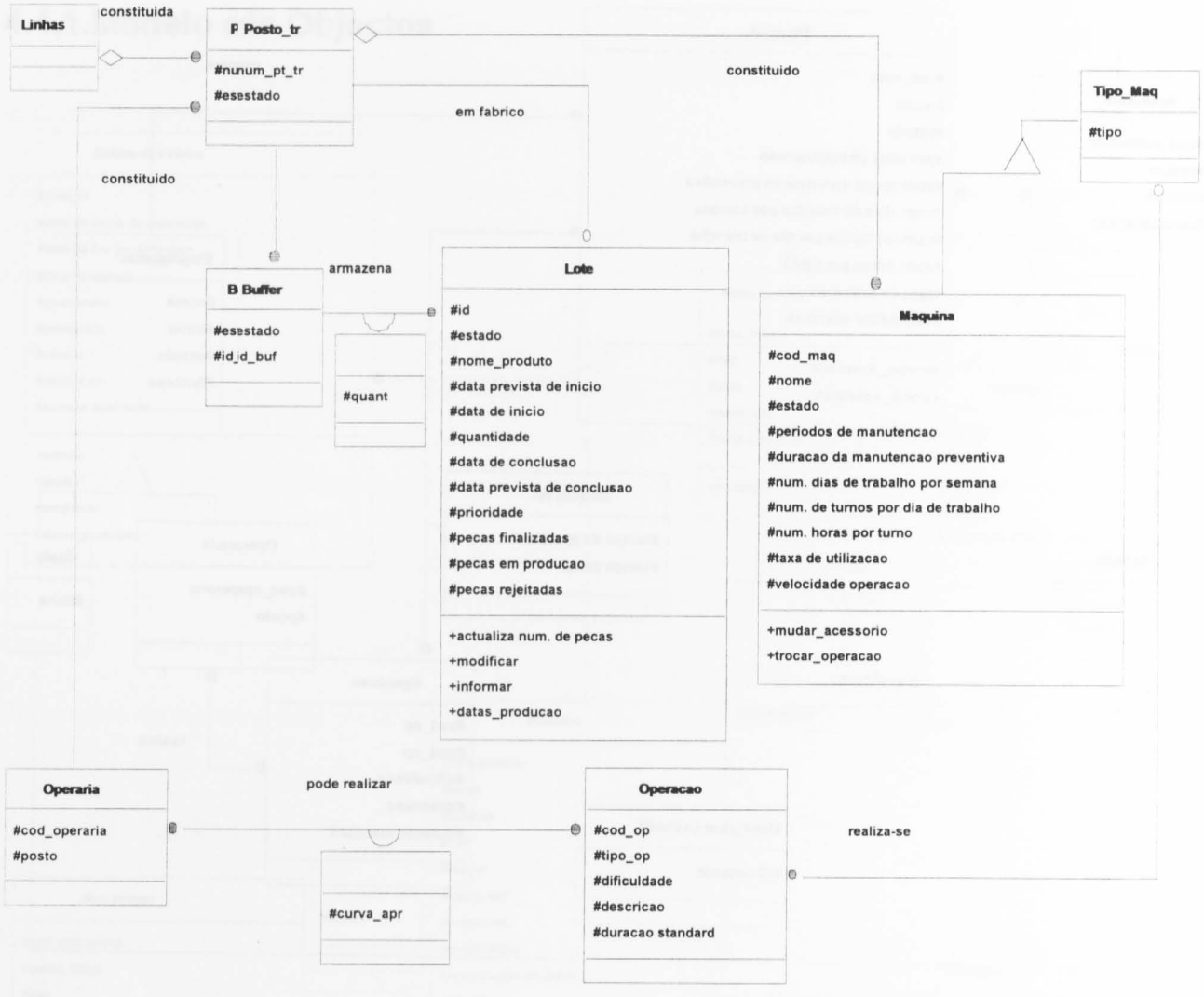


Fig. 4.7 - Terceira vista do modelo de objectos

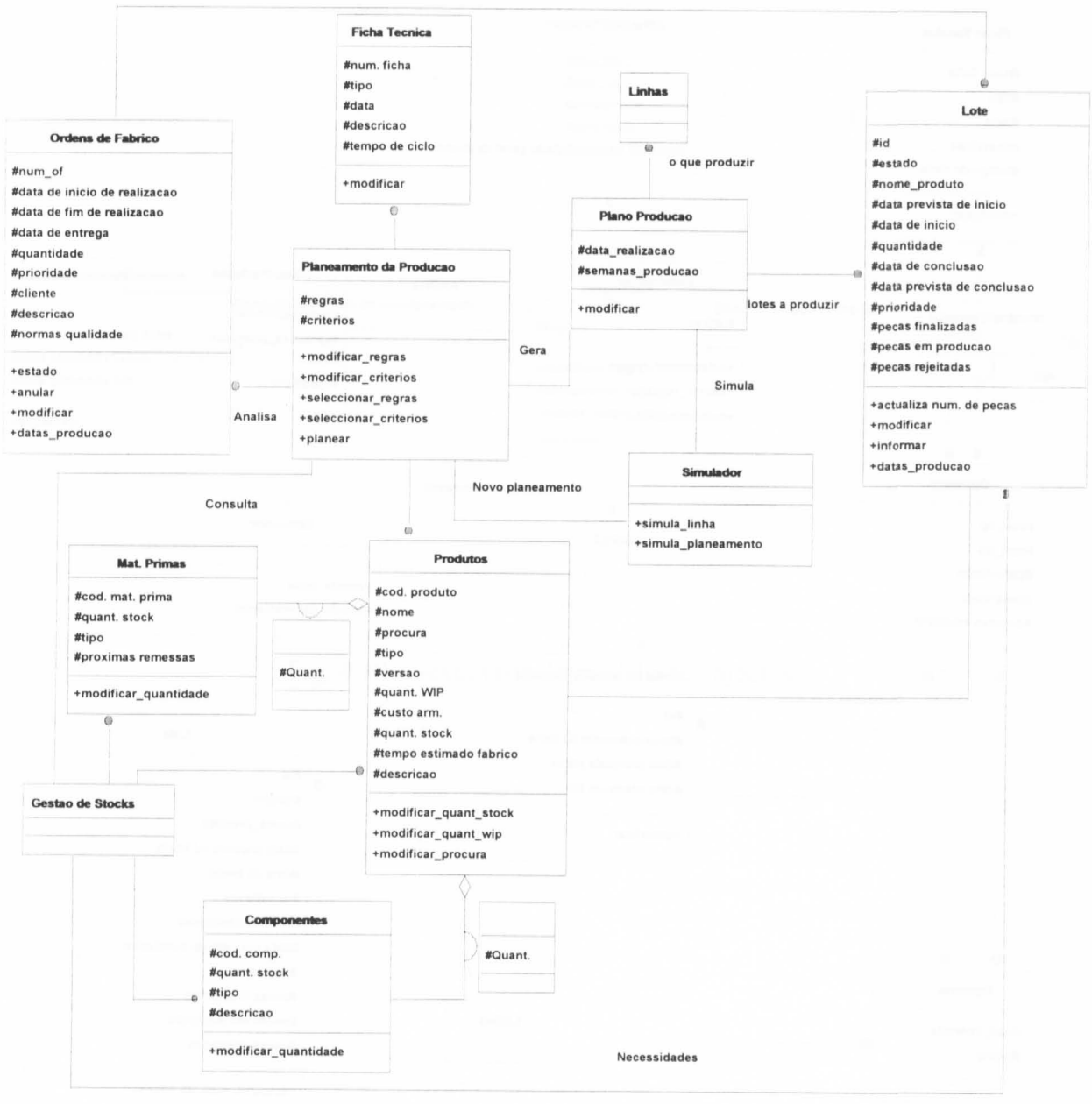


Fig. 4.8 - Quarta vista do modelo de objectos

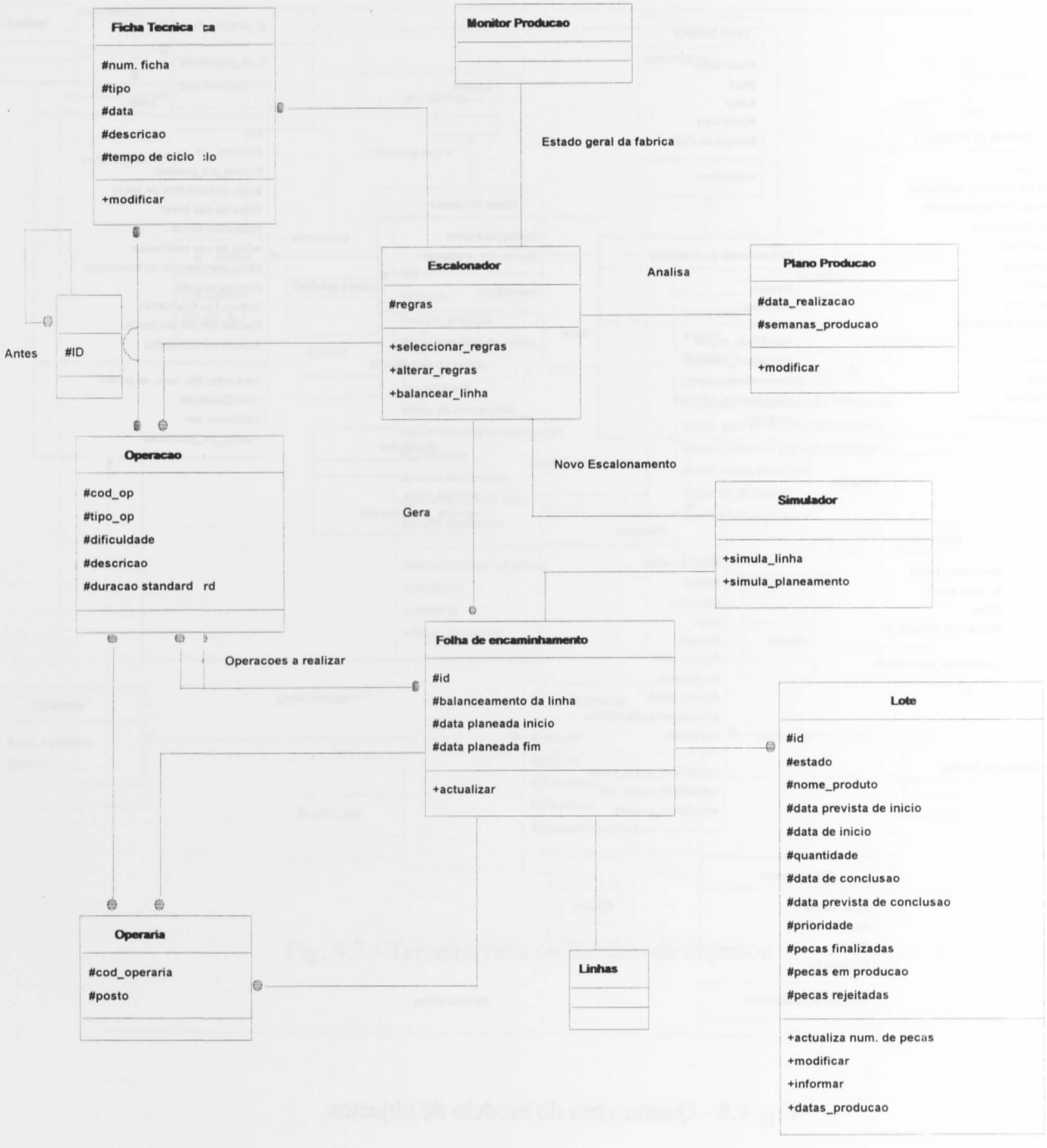


Fig. 4.9 - Quinta vista do modelo de objectos

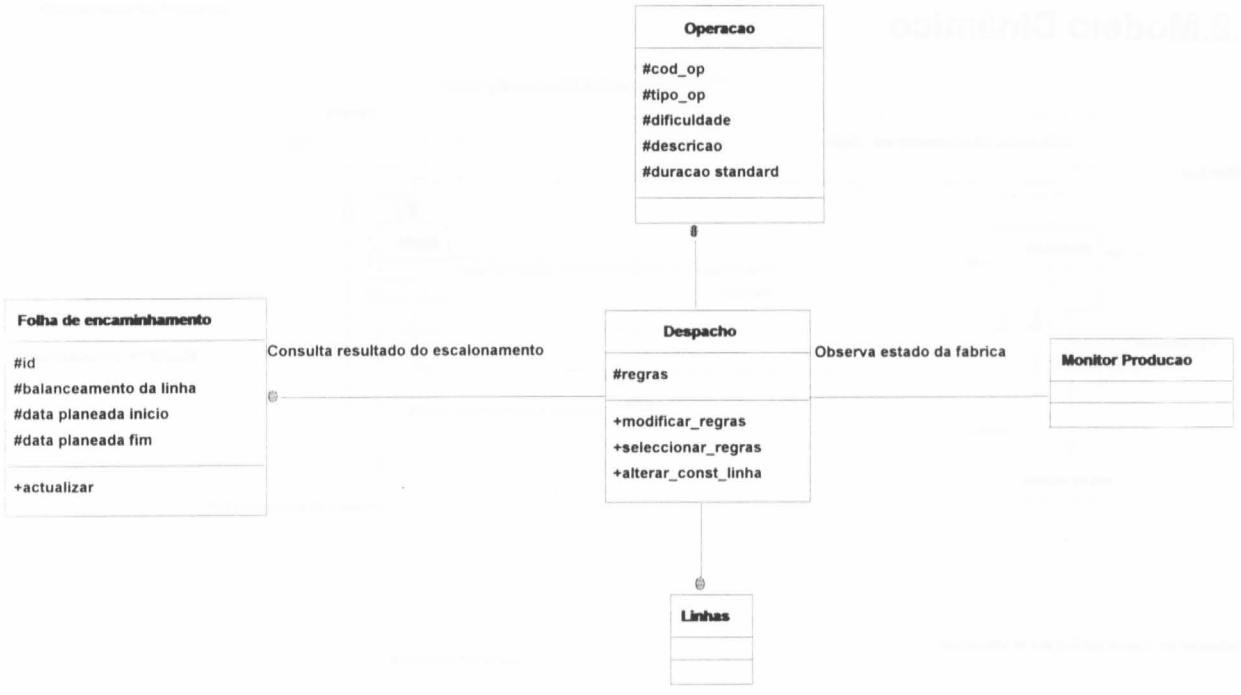


Fig. 4.10 - Sexta vista do modelo de objectos

4.4.2.Modelo I Dinâmico

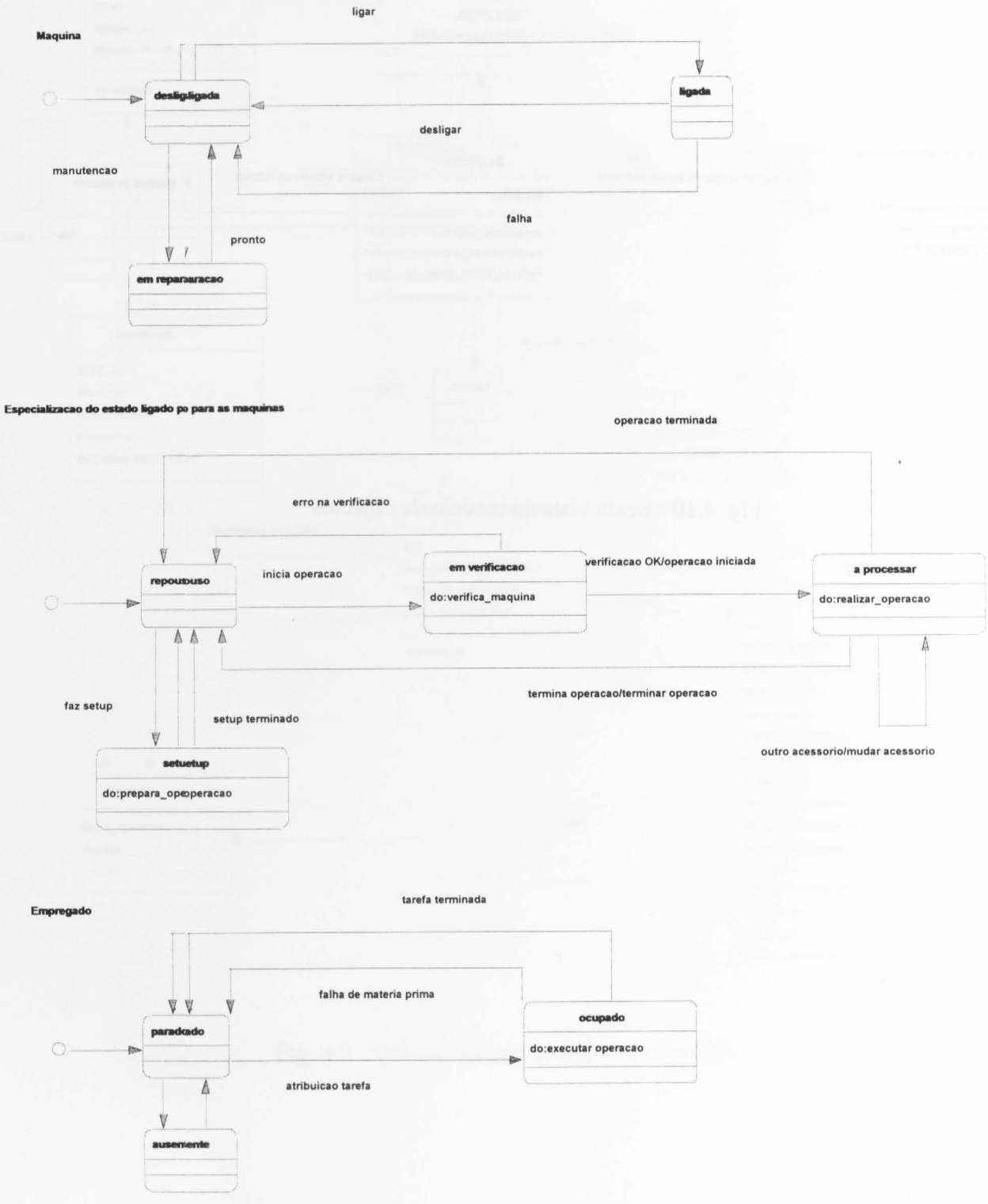


Fig. 4.11 - Primeira vista do modelo dinâmico



Fig. 4.12 - Segunda vista do modelo dinâmico

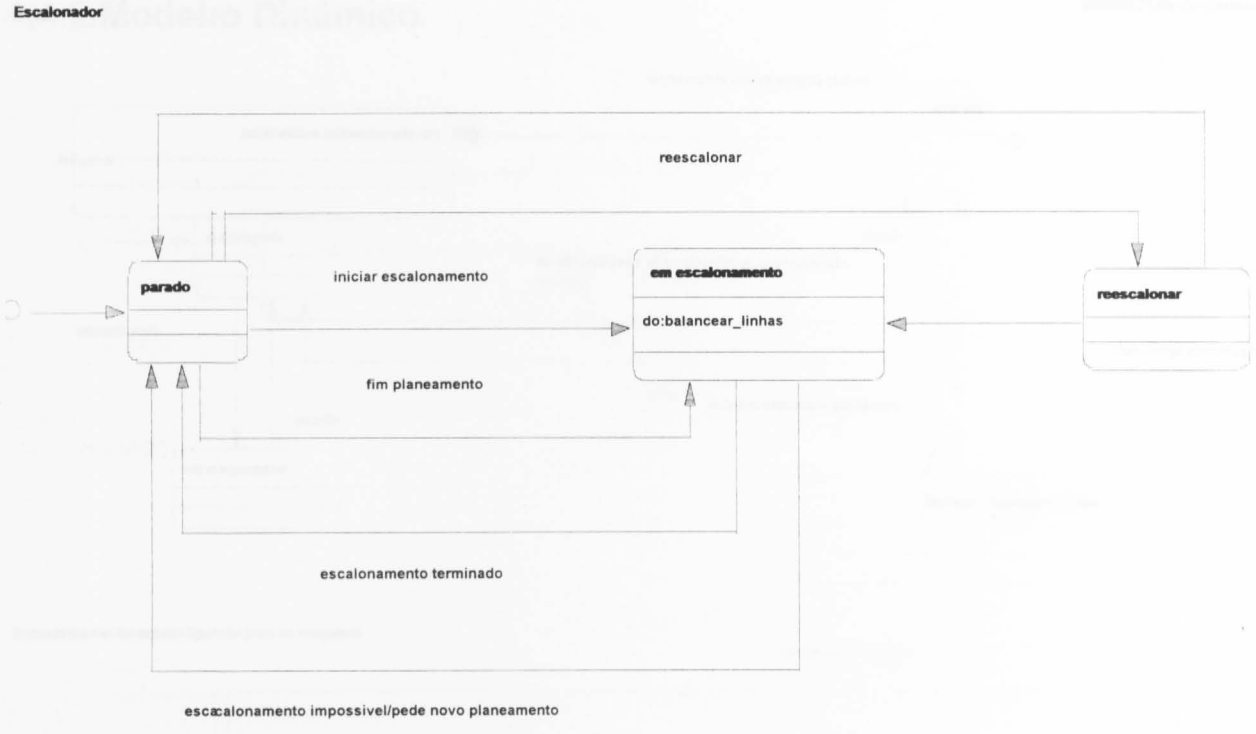




Fig. 4.13 - Terceira vista do modelo de objectos

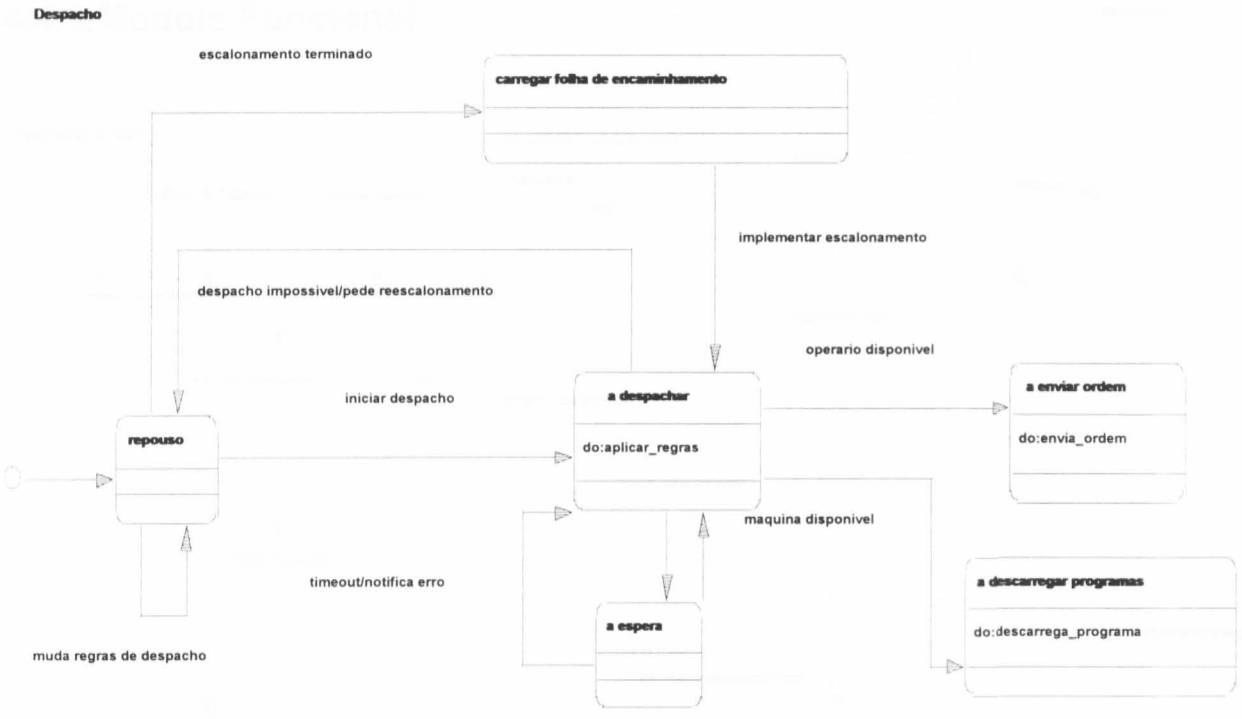


Fig. 4.14 - Quarta vista do modelo dinâmico

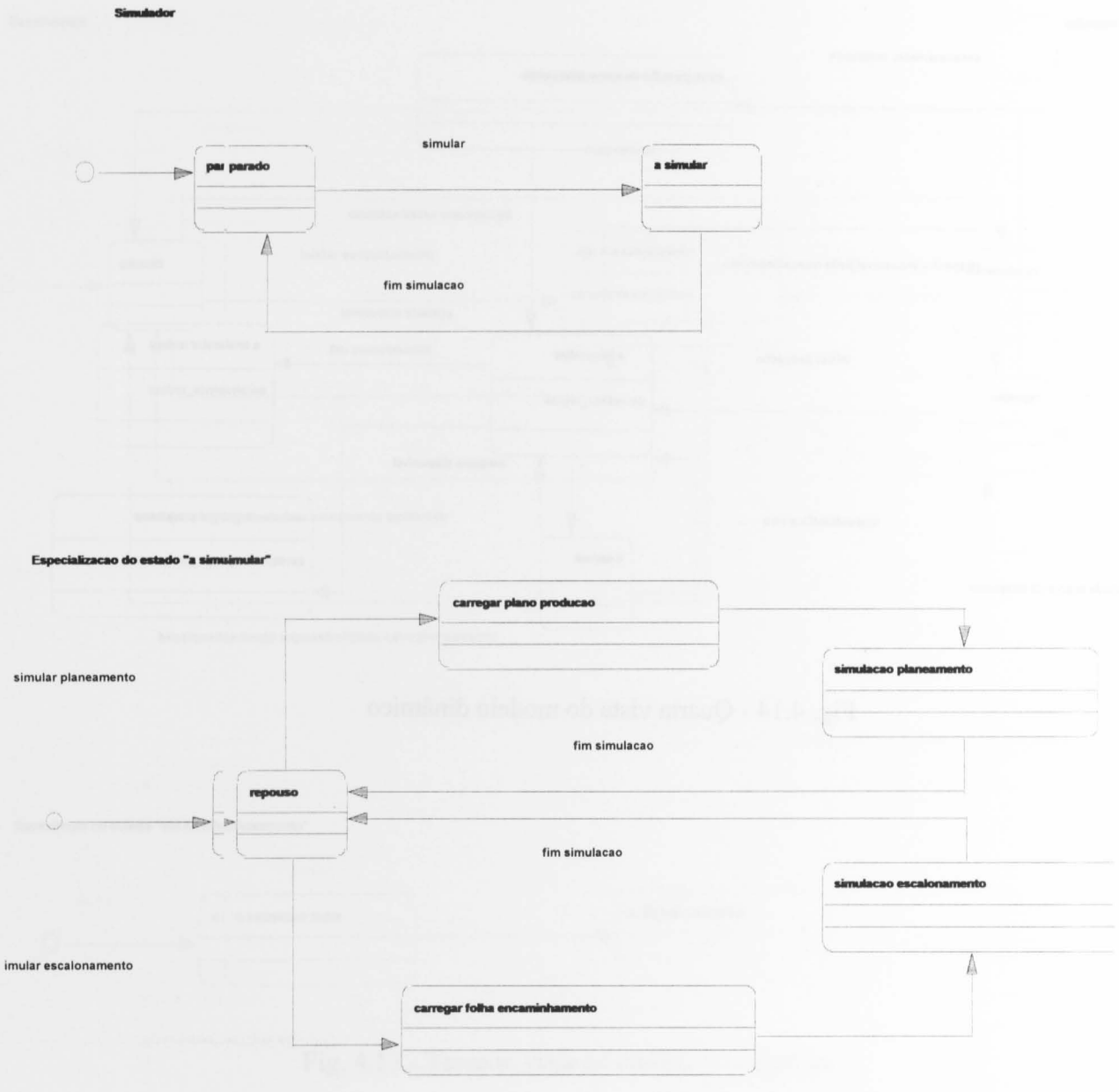


Fig. 4.15 - Quinta vista do modelo dinâmico

4.4.3.Modelo Funcional

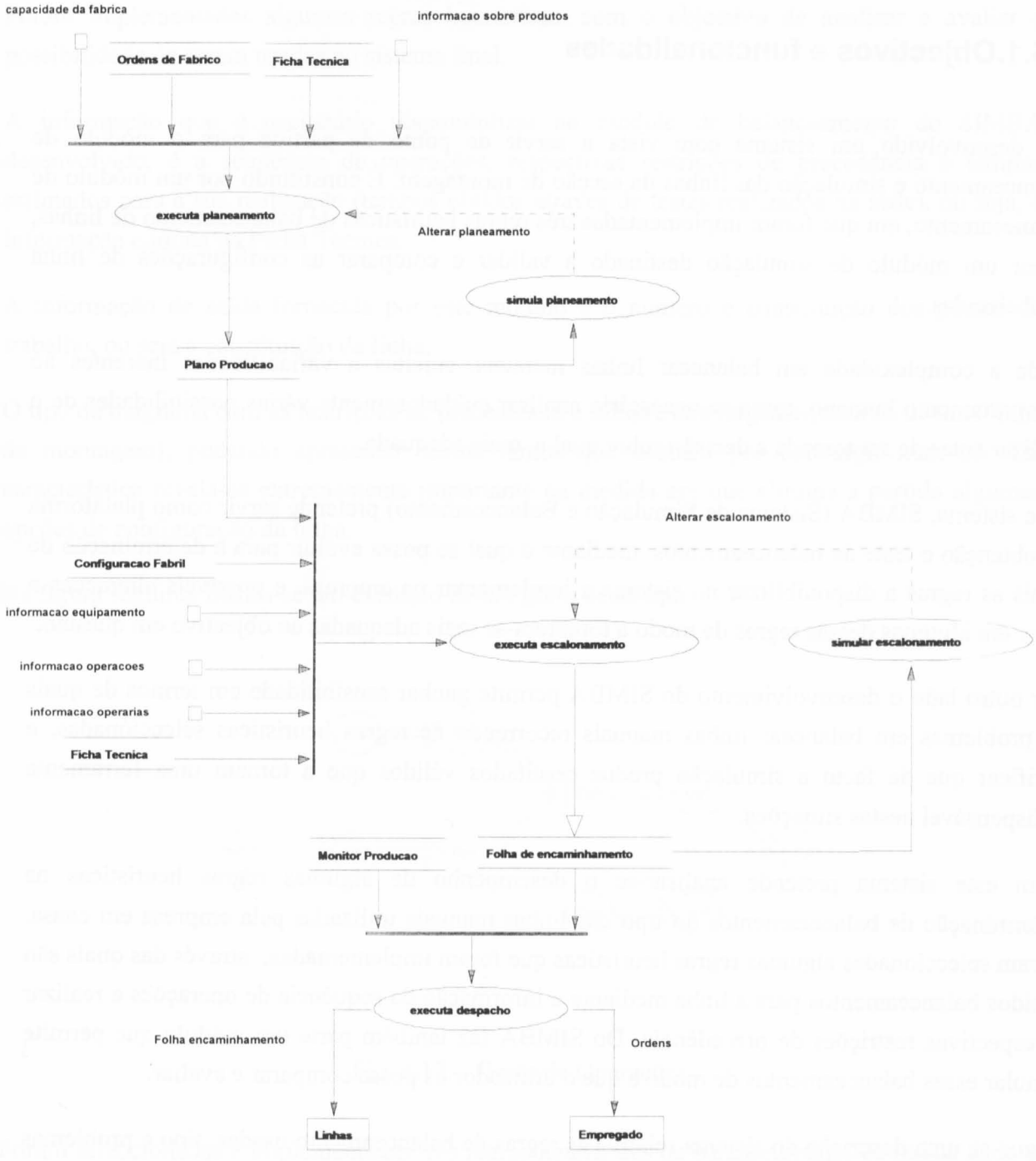


Fig. 4.16 - Modelo Funcional

4.5. Sistema desenvolvido

4.5.1. Objectivos e funcionalidades

Foi desenvolvido um sistema com vista a servir de ponto de partida para o módulo de balanceamento e simulação das linhas da secção de montagem. É constituído por um módulo de balanceamento, em que foram implementadas três regras heurísticas de balanceamento de linhas, e por um módulo de simulação destinado a validar e comparar as configurações de linha estabelecidas.

Dada a complexidade em balancear linhas manuais, sujeitas a variabilidades inerentes ao comportamento humano, torna-se necessário analisar cuidadosamente várias possibilidades de o realizar antes de ser tomada a decisão sobre qual a mais adequada.

Este sistema, SIMBA (Sistema de Simulação e Balanceamento) pretende servir como plataforma de obtenção e teste de balanceamentos, mediante o qual se possa evoluir para a determinação de quais as regras a disponibilizar no sistema a implementar na empresa, e possíveis alterações a fazer em algumas dessas regras de modo a tornarem-se mais adequadas ao objectivo em questão.

Por outro lado o desenvolvimento do SIMBA permite ganhar sensibilidade em termos de quais os problemas em balancear linhas manuais recorrendo às regras heurísticas seleccionadas, e verificar que de facto a simulação produz resultados válidos que a tornam uma ferramenta indispensável nestas situações.

Com este sistema pretende analisar-se o desempenho de algumas regras heurísticas na determinação de balanceamentos do tipo das linhas manuais utilizadas pela empresa em causa. Foram seleccionadas algumas regras heurísticas que foram implementadas, através das quais são obtidos balanceamentos para a linha mediante a informação da sequência de operações a realizar e respectivas restrições de precedência. Do SIMBA faz também parte um módulo que permite simular esses balanceamentos de modo a que o utilizador os possa comparar e avaliar.

Segue-se uma descrição do sistema relativa às regras de balanceamento usadas, tipo e problemas de simulação.

Todo o sistema foi desenvolvido em linguagem de programação C++, dada a sua predisposição à concretização da metodologia orientada a objectos, uma vez que os modelos, tal como referido e justificado anteriormente, foram desenvolvidos recorrendo a uma metodologia desse tipo.

4.5.2.Balanceamento

Foram implementadas algumas regras heurísticas, com o objectivo de analisar e avaliar a possibilidade de serem usadas no sistema final.

A informação que é necessário disponibilizar ao módulo de balanceamento do SIMBA desenvolvido, é a sequência de operações, respectivas restrições de precedência e tempos estimados para a sua realização (tempos obtidos através de testes realizados na sede), ou seja, a informação contida na Ficha Técnica.

A informação de saída fornecida por este módulo é o número e constituição dos postos de trabalho, ou seja a constituição da linha.

O tipo de diagrama com as restrições de precedência é sempre convergente (trata-se de uma linha de montagem), podendo apresentar vários ramos que acabam por convergir num só. Tal característica revela-se extremamente importante na medida em que elimina à partida algumas opções de configuração da linha.

Na figura seguinte ilustra-se um exemplo de um grafo deste tipo.

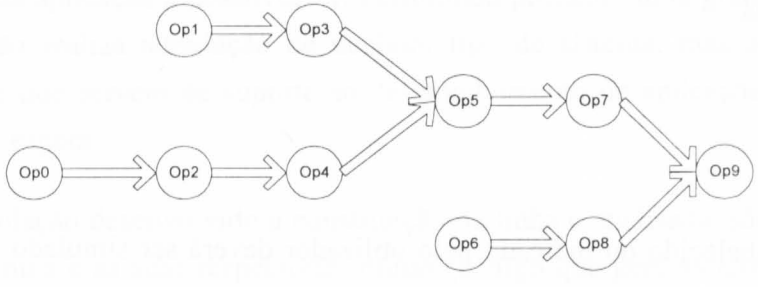


Fig. 4.17. - Grafo de Operações

Foram seleccionadas e implementadas três regras heurísticas de balanceamento de linhas dado o tempo de ciclo.

A análise efectuada baseou-se no estudo comparativo realizado por Boctor, [Boctor, 95]. Estudo esse em que foram analisadas 16 regras heurísticas na resolução de 67 problemas retirados da

literatura e 700 ¡ gerados aleatoriamente. Como critério de avaliação foi usado, nesse estudo, o número de vezess em que cada método conseguiu encontrar a solução óptima.

Os critérios para seleccionar as regras heurísticas foram o desempenho registado no estudo realizado por Booctor e a sua simplicidade.

O bom desempoenho das regras no estudo referido assegura que são capazes de obter boas soluções e muitaas vezes conseguem mesmo encontrar a solução óptima.

A sua simpliciddade permitirá obter resultados mais rapidamente, factor determinante para o estudo de várias ; soluções e auxílio à tomada de decisões, e facilita o processo de implementação em computador. . Por outro lado, utilizar regras simples permite introduzir futuramente alterações que as tornem mais adequadas ao balanceamento de linhas com variabilidade dos tempos de serviço tão acentituada como as que estão a ser objecto de análise.

A regra proposta por Boctor nesse mesmo documento foi uma das seleccionadas para implementar, uma vez que foi a que melhor desempenho apresentou. De entre as restantes foram seleccionadas a] Regra do Maior Candidato e o Método dos Pesos Posicionais, uma vez que se situam entre as ; cinco que melhores resultados registaram nesses testes comparativos, sendo regras simples e : portanto mais fáceis de adaptar futuramente, caso seja necessário.

O utilizador podde seleccionar de entre as regras implementadas a que deseja utilizar para obter o balanceamento dda linha.

4.5.3.Simulaação

O balanceamentto estabelecido ou indicado pelo utilizador deverá ser simulado em ordem a ser validado.

Em ambos os caasos a simulação pode ser efectuada com e sem atribuição de operárias aos postos de trabalho. No ¡ caso da simulação de balanceamentos em que já foram atribuídas operárias aos postos de trabalho, os rendimentos na realização das operações são obtidos a partir das suas curvas de aprenadizagem, caso contrário são utilizados os tempos estimados para a duração das operações.

A informação dee entrada necessária à simulação é a resultante da aplicação das regras anteriores. Caso se preteendam simular balanceamentos realizados manualmente, será necessário disponibilizar imformação sobre a constituição e o número dos postos de trabalho.

A constituição da linha é analisada e é observada a evolução e ocorrência dos eventos, registando-se os tempos de utilização de cada posto de trabalho, a quantidade de lotes que se vai acumulando entre os postos, e os dias necessários ao fabrico de todos os produtos que constituem a Ordem de Fabrico em questão.

A simulação mais adequada ao tratamento deste tipo de problemas é a simulação discreta de eventos, uma vez que o que é determinante neste caso é a modificação do estado do sistema face à ocorrência de determinados acontecimentos.

Após uma pesquisa realizada de várias ferramentas de simulação com o objectivo de encontrar alguma que servisse de suporte ao módulo de simulação a desenvolver, optou-se por utilizar o Sim++, módulo que integra o pacote SimPack [SimPack - Getting Started with Simulation in C and C++]. Trata-se de um conjunto de rotinas de suporte ao desenvolvimento de simulações de eventos discretos de modelos de filas de espera, que liberta o programador de alguns detalhes como, por exemplo, o escalonamento dos eventos, prioridades e preempção dos eventos e inclui ainda alguns geradores de números aleatórios.

Além de ser desenvolvido em C++ o que é extremamente vantajoso, dada a facilidade com que se integra com o trabalho desenvolvido no módulo de balanceamento e com o código desenvolvido para simular o comportamento das linhas de fabrico, o que motivou a escolha do Sim++ foi o facto de se tratar de um conjunto de rotinas para escalonar eventos que são definidos pelo programador da aplicação a desenvolver. Permitindo portanto, uma grande flexibilidade na medida em que não realiza simulação de nenhum tipo de sistema, mas apenas fornece um conjunto de rotinas que servem de suporte ao desenvolvimento de aplicações de simulação de modelos de filas de espera.

No módulo de simulação desenvolvido a constituição da linha é analisada, são implementados e escalonados os eventos e as suas respectivas rotinas (código que gera as alterações provocadas pela ocorrência desse evento). Este módulo funciona sobre as rotinas do Sim++, sendo o escalonamento dos eventos gerados realizado pelo mecanismo de escalonamento do Sim++, de acordo com os tempos de ocorrência (determinados na camada do módulo de simulação da aplicação) dos eventos escalonados.

Algumas das classes de objectos do modelo desenvolvido e implementadas neste sistema vão ser mapeadas em classes definidas pelo Sim++ de modo a que a simulação evolua de forma coerente.

Deste modo a cada "Lote" de produtos a fabricar, que se movimentam entre as várias estações de trabalho à medida que o seu fabrico vai evoluindo, fez-se corresponder um objecto da classe

"*Token*" do Sim+++. Da mesma maneira aos "Postos de Trabalho" é feita a correspondência a objectos da classe ""*Facility*" do Sim++ [Cubert].

Os eventos necessários à realização da simulação do comportamento das linhas de fabrico em estudo são:

- ▷ Arranque;
- ▷ Pedido_Posto;
- ▷ Liberar_Posto;
- ▷ Criar_tipo_lote;
- ▷ Actualizar_rendimento.

Eventos do tipo avaria de equipamento ainda não foram implementados, uma vez que não foi possível obter dados relativamente à frequência da sua ocorrência.

A ocorrência de cada um dos eventos anteriores modifica o comportamento ou estado do sistema. Essas alterações são especificadas na rotina de programação associada a cada um dos eventos e executada aquando da sua ocorrência.

Durante o decorrer da simulação, à medida que os eventos vão ocorrendo é possível visualizar ou mandar imprimir em ficheiro um conjunto de informação disponibilizada pelas rotinas do Sim++ e pela aplicação de simulação desenvolvida, o que permite analisar o mecanismo de escalonamento dos eventos e a quantidade de itens nos armazéns intermédios.

4.5.3.1.Eventos

Em seguida descreve-se o resultado da execução de cada uma das rotinas de eventos e alguns aspectos da sua implementação:

4.5.3.1.1.Arranque

Nesta rotina é lançado em produção um lote inicial de cada um dos tipos de lotes.

Os diferentes tipos de lotes estão associados ao número de ramos do grafo de operações. A cada ramo corresponde um tipo de lote (componente do produto final). No ramo final um lote de cada

um dos tipos de lotes componentes dão origem a um só tipo de lote do produto final. Em ramos intermédios lotes componentes de tipos diferentes podem ser associados para formar um outro tipo de lote componente (quando há convergência de ramos intermédios).

São, por fim, gerados eventos do tipo Pedido_Posto para cada um dos lotes iniciais criados. Eventos esses que vão depois ser escalonados, de acordo com o tempo indicado para a sua ocorrência, pelo mecanismo de escalonamento do Sim++.

4.5.3.1.2.Pedido_Posto

Um evento deste tipo é gerado quando um lote requer processamento de determinado posto de trabalho.

No caso de o posto estar disponível para iniciar o seu fabrico, é determinado o tempo de processamento que o tipo de lote requer, e é escalonado um evento do tipo Libertar_Posto para o instante em que termina o processamento. Caso contrário, continua em fila de espera até que o posto esteja livre para iniciar o processamento desse lote, altura em que de facto ocorre o evento.

O tempo de processamento do lote é obtido através dos tempos estimados de duração das operações, ou caso já se tenham atribuído operárias aos postos de trabalho, através das curvas de aprendizagem.

4.5.3.1.3.Libertar_Posto

A ocorrência de um evento deste tipo corresponde ao término de processamento de um lote num posto de trabalho.

Quando um lote terminou o seu processamento num posto de trabalho podem ocorrer várias situações:

- lote terminou o seu fabrico (estava a ser processado no último posto de trabalho), é actualizada a contagem dos lotes que já foram processados.
- se o lote continua em fabrico, é necessário analisar se é um tipo de lote componente que vai ter de esperar por outro tipo de lote componente para prosseguir o fabrico dando origem a um novo tipo de lote (outro ramo do grafo convergente de operações). Se a situação anterior se verificar é escalonado um

evento do tipo Criar_tipo_lote. Se não se verificar, é escalonado um evento do tipo IPedido_Posto para requisitar o posto de trabalho seguinte.

Em qualquer dos casos é necessário verificar se se trata de um tipo de lote inicial (lote de entrada em qualquer dos ramos do grafo de operações). Se for um tipo de lote inicial é necessário contabilizar se ainda há mais lotes para serem processados e se for esse o caso é escalonado o início de fabrico de mais um lote (requisição do posto de trabalho inicial correspondente).

4.5.3.1.4.Criar_tipo_lote

A ocorrência de um evento deste tipo surge quando diferentes tipos de lotes componentes têm de ser conjugados para fabricar um novo tipo de lote (montagem de componentes).

Neste caso é necesssário verificar se está disponível um lote de cada um dos tipos necessários para que o fabrico prossiga. Se assim for um lote de novo tipo passa a ser fabricado, sendo escalonado um evento Pedido_Posto seguinte, senão, o lote componente aguarda (em armazém) até que todos os componentes estejam disponíveis.

4.5.3.1.5.Actualizar_rendimento

Este evento não corresponde a um acontecimento no sistema que provoque alteração do seu estado, mas sim a um evento necessário à aplicação de simulação para actualizar os rendimentos das operárias ao longo do tempo.

Só é utilizado na simulação de linhas de fabrico em que já tenham sido atribuídas operárias às estações de trabalho e se pretende entrar em linha de conta com a variabilidade imposta pelas suas curvas de aprendizagem.

Sempre que ocorre um evento deste tipo os rendimentos de cada uma das operárias são actualizados, de accordo com as respectivas curvas de aprendizagem e tempo decorrido (unidades do tempo de simulação são minutos).

Este sistema foi utilizado para realizar alguns testes com exemplos de grafos de operações dos produtos a fabricar na empresa de modo a analisar o comportamento das linhas e balanceamentos obtidos pelas regras heurísticas implementadas.

4.5.4.Aplicação do SIMBA

O SIMBA é validado a partir dos resultados da sua aplicação a uma linha de produção com as característica reais da empresa em análise.

Ficheiros com a informação de entrada referente às fichas técnicas (quantidade de produtos a fabricar, tamanho dos lotes, quantidade, duração e restrições de precedência das operações) foram elaborados, bem como ficheiros com as configurações de linha (quantidade de postos de trabalho e operações a realizar em cada um deles, além dos parâmetros da curva de aprendizagem das operárias afectas aos postos) sugeridas, pelos responsáveis pelo balanceamento das linhas de montagem na empresa, para o fabrico desses produtos para comparação com o desempenho das configurações sugeridas pelas regras de balanceamento implementadas no SIMBA.

As regras de balanceamento implementadas no sistema são a Heurística Multi-Regra, Método dos Pesos Posicionais, e a Regra do Maior Candidato.

Os testes foram realizados com dois tipos de produtos em que, apesar de existirem vários modelos diferentes, o fabrico de todos eles segue um grafo de operações muito semelhante, constituindo por isso um bom ponto de partida. Para cada um deles foi simulado o fabrico de 50 lotes de 100 peças cada.

O grafo de operações e os ficheiros com a Ficha Técnica dos produtos em análise podem ser consultados em anexo.

Os critérios de comparação das diferentes configurações obtidas para as linhas são:

- ▷ número de postos de trabalho (quantidade de recursos de mão de obra e equipamento) utilizados;
- ▷ perdas de balanceamento da linha;
- ▷ níveis de *stocks* de peças entre postos de trabalho;
- ▷ detecção de estações gargalo;
- ▷ tempos de utilização dos postos de trabalho;
- ▷ número de dias necessários ao fabrico do total de produtos indicado na Ficha Técnica;

Os quatro últimos critérios só podem ser avaliados com o recurso à simulação do fabrico para cada configuração de linha em análise. Dada a sua importância na comparação e avaliação de qual a melhor configuração de linha a utilizar mais uma vez se conclui da extrema necessidade de recorrer a ferramentas de simulação.

Uma das características que pode servir de critério na selecção da melhor configuração de linha a utilizar no fabrico dos produtos seria a quantidade de refluxos (quantos mais existirem maior o tempo de trânsito). No entanto, uma vez que as regras de balanceamento utilizadas respeitam o grafo de precedências na distribuição de operárias pelos postos de trabalho, as configurações de linha sugeridas não apresentam refluxos. Esta característica poderá, contudo, ser utilizada na comparação com configurações sugeridas pelos responsáveis do balanceamento das linhas de montagem da empresa (futuros utilizadores do sistema final). A importância dos refluxos surge essencialmente na medida em que trazem mais dificuldades nas zonas de transição entre o fabrico de produtos ou modelos diferentes.

Em primeiro lugar foi realizado o balanceamento da linha para os Tempos de Ciclo especificados na Ficha Técnica da empresa, e comparados os resultados obtidos deste modo.

Na tentativa de diminuir a quantidade de recursos necessários e os tempos mortos obtidos com as configurações determinadas anteriormente (tempos estimados com auxílio do módulo de simulação do sistema), efectuaram-se balanceamentos recorrendo a cada uma das regras indicadas, para um Tempo de Ciclo superior ao indicado na Ficha Técnica, e determinado pela duração da operação mais demorada.

Uma configuração de linha, sugerida pela empresa para o fabrico do produto em questão, foi também simulada de modo a comparar os resultados obtidos com as restantes configurações determinadas pelas regras de balanceamento implementadas.

Em todos os casos foram simuladas as linhas antes, considerando os tempos *standard* de duração das operações, e depois de atribuir operárias aos postos de trabalho. Deste modo foi possível analisar os efeitos introduzidos ao considerar a variabilidade inerente ao comportamento humano, caracterizada pelos parâmetros das curvas de aprendizagem.

4.5.4.1.Discussão de resultados

4.5.4.1.1.Resultados obtidos para o Tempo de ciclo indicado na Ficha Técnica

Foram calculados os balanceamentos da linha recorrendo a cada uma das regras de balanceamento implementadas. Em seguida foram simulados os resultados obtidos com durações das operações dadas pelos tempos *standard* e após a atribuição de operárias aos postos de trabalho. A atribuição de operárias aos postos de trabalho foi aleatória, uma vez que o algoritmo de atribuição não é um dos objectivos desta primeira fase à qual o sistema se destina. No entanto foi possível observar que a variabilidade introduzida pelas curvas de aprendizagem é capaz de introduzir alterações significativas relativamente às observadas na análise com as durações *standard* das operações.

4.5.4.1.1.1.Exemplo1 produto(#3030)

Para a produção do produto #3030, cujo grafo de operações pode ser analisado em anexo, concluiu-se que:

1) o balanceamento obtido para a Heurística Multi-Regra foi idêntico ao obtido pelo Método dos Pesos Posicionais, sendo o tamanho da linha de 16 postos, com 7 postos duplos (postos em paralelo dado a duração da operação ser superior ao Tempo de Ciclo pretendido), o que perfaz um total de recursos de 23 operárias e 20 máquinas. As perdas de balanceamento teóricas são de 4.69.

A análise através de simulação revelou que são necessários 7 dias para fabricar as 5000 peças que constituem a Ordem de Fabrico, na análise com durações das operações *standard*, e 6 na análise após atribuição de operárias aos postos de trabalho.

Não se registou acumulação significativa de lotes entre os postos.

Os tempos de utilização registados com recurso à simulação apresentam valor médio de cerca de 59%.

2) com a Regra do Maior Candidato obteve-se um balanceamento para a linha com 16 postos de trabalho, com 7 postos duplos, o que perfaz um total de 23 operárias e 19 máquinas. As perdas de balanceamento teóricas são de 4.69.

Para completar o fabrico de todas as peças foram necessários 7 dias, na simulação com tempos *standard*, e 6 na simulação após atribuição de operárias.

Quanto aos níveis atingidos pela acumulação de lotes à entrada dos postos de trabalho, regista-se uma elevada acumulação à entrada do Posto 2 de valor máximo 11 lotes, na simulação com tempos *standard*, e de 9 lotes na simulação após atribuição de operárias aos postos.

Os tempos mortos apresentam uma média de cerca de 58%.

Da comparação dos dois resultados obtidos resulta que:

- relativamente à quantidade de postos de trabalho e operárias necessárias os resultados são idênticos. Quanto à ligeira diferença na quantidade de máquinas necessárias não é significativa pois existe um vasto *stock* deste equipamento;
- as perdas de balanceamento são idênticas;
- acumulação de *stocks* apenas se revela mais significativa na configuração obtida no caso 2);
- os níveis de lotes acumulados entre os postos de trabalho registados pela análise feita com o módulo de simulação permitem concluir que o Posto 2 na configuração 2) se revelou um posto gargalo;
- a diferença entre a configuração 1) e 2) relativamente aos tempos de utilização dos váriros postos de trabalho não é significativa;
- quanto ao número de dias necessários ao fabrico da totalidade dos produtos verifica-se que os resultados obtidos foram também idênticos.

Face às características enunciadas de cada um dos balanceamentos obtidos, e uma vez que a configuração 1) não apresenta acumulação significativa de lotes entre postos de trabalho, enquanto que na configuração 2) se detectou um posto gargalo, seria a configuração 1) a mais indicada a implementar na prática. No entanto, dada a enorme variabilidade presente quer devido aos diferentes rendimentos e curvas de aprendizagem das operárias, quer devido a imprevistos que acabam por acontecer na prática como absentismo, problemas físicos ou psíquicos das operárias que em muito afectam o seu rendimento, tal conclusão só poderia ser tomada com maior segurança por parte da pessoa responsável que lida directamente e todos os dias com esses acontecimentos. podendo realizar-se mais simulações de variantes destas configurações na tentativa de as melhorar.

4.5.4.1.1.2.Exemplo2 (produto #3830)

Estudo realizado com o produto #3830, cujo grafo de operações pode ser analisado em anexo.

Os resultados verificados foram os seguintes:

1) com a Heurística Multi-Regra e a Regra do Maior Candidato obteve-se o mesmo resultado, com 11 postos de trabalho em que 4 são postos duplos, e 1.93 de perdas de balanceamento (teóricas). São necessárias 15 operárias, 11 máquinas e 10 dias para produzir a totalidade de produtos.

A comparação das simulações realizadas antes e depois de se terem atribuído operárias aos postos de trabalho, permitiu verificar que a variabilidade introduzida com as curvas de aprendizagem das operárias acaba por ser compensatória, pois o tempo necessário ao fabrico dos produtos passou de 10 para 8 dias.

Os níveis de peças acumuladas à entrada dos postos não é significativo a não ser à entrada do Posto 6 na simulação após a atribuição de operárias aos postos de trabalho, atingindo um valor máximo de 5 lotes.

Os tempos de utilização apresentados são bastante razoáveis, existindo apenas 2 valores que rondam os 50%, sendo os restantes superiores e a rondar, na média, os 75%.

2) com o Método dos Pesos Posicionais o tamanho da linha obtida foi de 12 postos de trabalho, com 4 postos duplos, perdas de balanceamento teóricas de 2.93, 16 operárias, 12 máquinas e 10 dias para completar a produção.

Também neste caso, com o auxílio do módulo de simulação, foi possível verificar que a variabilidade introduzida pelas curvas de aprendizagem permitiu reduzir o tempo de fabrico de todos os produtos de 10 para 9 dias.

A acumulação de lotes entre postos de trabalho, analisada com recurso ao módulo de simulação do sistema desenvolvido, permitiu concluir que o Posto 4 é um posto gargalo, dada a acumulação de lotes à sua entrada (10 e 11 lotes na simulação respectivamente antes e depois de atribuir operárias aos postos). À entrada do Posto 2 também se acumula uma quantidade significativa de lotes, chegando a atingir um valos máximo de 8, bem como à entrada do Posto 8 cujo valor máximo obtido na simulação após atribuição de operárias foi de 7 lotes.

Os tempos médios de utilização rondam os 64%.

Não há alteração significativa dos tempos de utilização relativamente à configuração anterior.

Comparando os resultados obtidos face aos critérios seleccionados, verifica-se que:

- em relação à quantidade de postos de trabalho e recursos, a configuração proposta pela Heurística Multi-Regra e pela Regra do Maior Candidato é a que necessita de menor quantidade;
- quanto às perdas de balanceamento teóricas foi também a configuração 1) que apresentou o menor valor;
- relativamente à acumulação de *stocks* os maiores problemas encontram-se na configuração proposta pelo Método dos Pesos Posicionais;
- na configuração apresentada em 2) dada a quantidade de lotes que se chega a acumular à entrada do Posto 4 este é considerado um posto gargalo, existindo também problemas do mesmo género com o Posto 2 e com o Posto 8;
- nos tempos de utilização dos postos de trabalho os melhores resultados são os da configuração proposta em 1);
- quanto ao número de dias necessários para fabricar todas as peças na configuração 1), na simulação com operárias atribuídas aos postos de trabalho, conseguiu realizar-se tudo em 8 dias, sendo este o melhor valor registado.

Face à comparação estabelecida a configuração que apresenta à partida melhores características é a proposta pela Heurística Multi-Regra e Regra do Maior Candidato.

4.5.4.1.2.Resultados obtidos para o Tempo de ciclo determinado pela maior operação

Existem operações cuja duração *standard* (duração estimada através da realização de testes na sede) excede o Tempo de Ciclo com que se pretendia balancear a linha. Tal introduziu a necessidade de que alguns postos de trabalho fossem duplicados, o que aumenta a quantidade de recursos, quer em termos de mão de obra quer em termos de equipamento. Se relativamente ao equipamento não se verificam grandes problemas, pois existe um considerável parque de máquinas em *stock*, em relação à quantidade de operárias utilizadas há que ter mais cuidado pois podem ser necessárias noutro ponto do fabrico (noutra linha ou secção). Por este facto entendeu-

se relevante analisar balanceamentos em que embora se registe uma diminuição da taxa produtiva (maior Tempo de Ciclo), não são necessários tantos recursos.

Realizaram-se então, para os dois exemplos de produtos considerados, novos balanceamentos, através das heurísticas implementadas, para um Tempo de Ciclo idêntico à maior duração *standard* das várias operações.

4.5.4.1.2.1.Exemplo1 (produto #3030)

Neste caso verificou-se que todas as regras de balanceamento implementadas forneceram o mesmo resultado.

As suas características são:

- 12 postos de trabalho a que correspondem 12 operárias (não há postos duplicados) e 11 máquinas, as perdas de balanceamento (teóricas) são de 1.61, são necessários 11 dias para fabricar todos os produtos considerando os tempos *standard* de duração das operações e 10 dias no caso de já estarem atribuídas operárias, com introdução da variabilidade associada às suas curvas de aprendizagem.
- O valor médio dos tempos de utilização em cerca de 65%.
- Os níveis de *stocks* acumulados antes de cada posto de trabalho são, na análise com os tempos *standard* de duração das operações, apenas significativos antes do Posto 7 apresentando um valor máximo de 6 lotes (600 peças). Na análise após atribuição de operárias verifica-se que à entrada do Posto 6 e do Posto 8 os *stocks* atingem o valor de 6 lotes, enquanto nos restantes não se acumula quantidade significativa de lotes.

Da comparação destes resultados com os obtidos para um tempo de ciclo inferior, apresentados na secção anterior, verifica-se que de facto o aumento no tempo de ciclo provocou um aumento significativo na quantidade de dias necessários ao fabrico de todos os produtos de quatro dias. Embora as perdas teóricas sejam bastante inferiores, 1.61 em relação a 4.69, o aumento dos tempos médios de utilização foi apenas de 59% para cerca de 65%. Além de que, neste caso verificou-se existir acumulação de *stocks* que atingem os 6 lotes à entrada de dois postos, enquanto que no caso anterior não houve acumulação significativa a registar.

Apesar de na connfiguração proposta pela secção anterior se conseguir uma melhor taxa de produção, a decisão de qual a configuração a adoptar na prática terá que avaliar a quantidade de recursos de mão dde obra disponíveis para trabalhar nessa linha. Facto que poderá tornar inviável as configurações ppropostas na secção anterior, por necessitarem de maior número de operárias.

4.5.4.1.2.2.Exemmplo2 (produto #3830)

Na análise do fabririco deste produto utilizando o sistema desenvolvido, observou-se que:

1) com a Heurísticca Multi-Regra as características do balanceamento são:

- ▷ 8 poostos de trabalho, 8 operárias (uma por posto), 9 máquinas de costura, com perdas de balanceamento (teóricas) de 1.88.
- ▷ Os dias necessários para fabricar todos os produtos são na análise com durações *stanndard* das operações de 18 dias, e na análise após atribuição de operárias de 15 dias.
- ▷ A acumulação de peças em curso de fabrico foi de 6 lotes à entrada do Posto 2, na simulação com tempos *standard*, e de 5 lotes à entrada do mesmo posto na simulação com a variabilidade introduzida pela atribuição de operárias aos postos, sendo insignificante ou mesmo nula a acumulação de peças nos outros postos de trabalho.
- ▷ A média dos tempos de utilização ronda os 71%.

2) com o método dos Pesos Posicionais conseguiu-se um balanceamento com:

- ▷ 8 poostos de trabalho, 8 operárias, 10 máquinas, e perdas teóricas de 1.88.
- ▷ Neste caso são necessários 24 e 19 dias para o fabrico da totalidade dos produtos, sem e com a atribuição de operárias aos postos de trabalho respectivamente.
- ▷ Verifica-se neste caso uma enorme acumulação de lotes em curso de fabrico à entrada do Posto 4, que atinge os valores de 18 lotes na análise com tempos *stanndard*, e de 17 lotes na análise após atribuição de operárias aos postos. Nos restantes postos os valores são bem mais baixos, sendo apenas significativos os registados à entrada do Posto 2 que atingem 5 e 4 lotes respectivamente em cada uma das análises referidas.

- Os tempos de utilização, obtidos com recurso à simulação do funcionamento das linhas, apresentaram um valor médio de 54%.

3) a Regra do Maior Candidato forneceu um balanceamento em que são necessários:

- 8 postos de trabalho, 8 operárias, 10 máquinas de costura, registando-se um valor de 1.88 de perdas de balanceamento (teóricas).

- A simulação considerando as durações *standard* para as operações registou a necessidade de 18 dias para o fabrico da totalidade dos produtos, enquanto que, com as durações obtidas tendo em conta a variabilidade das operárias atribuídas aos postos, se verificou serem necessários apenas 15 dias.

- Neste caso verificou-se que a quantidade de peças acumuladas atinge à entrada do Posto 4 o valor máximo de 6 lotes, não sendo significativa a acumulação de lotes noutros pontos da linha.

- A média dos tempos de utilização registados é de 70%.

Comparando os resultados relativamente aos critérios estabelecidos, verifica-se que:

- o número de postos de trabalho e recursos é idêntico nos três casos;

- as perdas de balanceamento teóricas são também idênticas nos três casos;

- relativamente à acumulação de lotes entre postos de trabalho a configuração obtida pelo Método dos Pesos Posicionais é francamente pior, sendo semelhantes as características das outras duas configurações;

- na configuração 2 detecta-se o Posto 4 como postos gargalo;

- relativamente aos tempos de utilização registados pela simulação as configurações 1) e 3) apresentam valor semelhante e bem melhor que o da configuração 1);

- quanto ao número de dias necessários para fabricar todos os produtos são também idênticos os resultados de 1) e 3), e melhores que os resultados de 2).

Pela análise realizada verifica-se que as características da configuração proposta pela Heurística Multi-Regra e Regra do Maior Candidato são muito idênticas e melhores que as da linha proposta pelo Método dos Pesos Posicionais.

Comparando estes resultados com os obtidos na secção anterior, verifica-se que embora os recursos utilizados sejam menos, o tempo necessário à produção de todos os produtos é muito mais elevado. Deste modo só o facto de não ser possível utilizar a quantidade de mão de obra necessária aos balanceamentos anteriores, justificaria o recurso a uma configuração deste tipo.

4.5.4.1.3.Resultados obtidos para as configurações sugeridas

Foi também realizada a análise dos resultados obtidos para uma configuração sugerida pelos responsáveis pelo balanceamento das linhas, já com operárias distribuídas pelos postos de trabalho, resultado da aplicação das regras empíricas e conhecimento adquirido ao longo do tempo.

As configurações propostas encontram-se em anexo.

4.5.4.1.3.1.Exemplo1 (produto #3030)

A configuração de linha proposta para o fabrico deste produto envolve 12 postos de trabalho, 15 operárias, 18 máquinas de costura e são necessários 8 dias para completar o fabrico das 5000 peças. As perdas de balanceamento são de 2.46 (perdas teóricas).

A nível de acumulação de peças entre os postos de trabalho é de registar a enorme quantidade que se chega acumular à entrada do Posto 2 (posto gargalo), cujo valor máximo chega aos 14 lotes.

Os tempos de utilização dos postos de trabalho verificou-se, após simulação, apresentarem uma média que ronda os 64%.

Os refluxos presentes nesta configuração são pouco significativos.

Esta configuração permite obter uma taxa produtiva semelhante à da configuração proposta para este produto na secção 4.5.4.1.1., utilizando, no entanto, menos recursos. O problema reside no facto de apresentar um posto gargalo, em que se verifica uma acumulação de lotes que chega aos 14 (1400 peças). Problema que pode tentar resolver-se duplicando esse posto.

Mais uma vez a decisão de qual a melhor a configuração a implementar terá que ser tomada pelos responsáveis neste campo, face aos recursos disponíveis e à importância que atribuem às desvantagens que se podem associar a cada uma.

4.5.4.1.3.2.Exemplo2 (produto #3830)

No caso deste produto a configuração fornecida pelos responsáveis pelo balanceamento das linhas da empresa utiliza 9 postos de trabalho, 13 operárias, 12 máquinas de costura, perdas de balanceamento (teóricas) de 3.325 e são necessários 12 dias para fabricar todos os produtos.

Em relação à quantidade de lotes acumulada à entrada dos postos, verifica-se uma acumulação deveras excessiva à entrada do Posto 2 (posto gargalo) que chega a atingir os 30 lotes, e do Posto 5 (posto gargalo) que atinge os 18 lotes. No Posto 6 regista-se uma acumulação máxima de 7 lotes, bastante inferior às referidas para os Postos 2 e 5. Nos restantes postos a acumulação de peças não é significativa.

Depois de simulada a linha constatou-se que os tempos de utilização médios são de cerca de 57%.

Apresenta alguns refluxos de reduzida extensão e por isso mesmo pouco significativos.

Esta configuração utiliza menos recursos que as da secção 4.5.4.1.1 mas necessita de mais dias para concluir o fabrico de todos os produtos, no entanto relativamente às configurações da secção anterior a quantidade de recursos é mais elevada, mas os dias em fabrico necessários são menos.

Mais uma vez se constata que a decisão de qual a configuração adequada depende da avaliação de uma quantidade de características, como a quantidade de recursos envolvidos, para as quais à partida não é possível quantificar o valor mais vantajoso, uma vez que dependem do estado da fábrica em cada instante e da forma como as capacidades e recursos são distribuídas pelas várias secções.

4.5.5.Conclusões

Foi feita a análise de uma indústria do sector das confecções e detectados os principais problemas que os seus responsáveis têm que enfrentar. Dessa análise resultou a estruturação e especificação de um sistema informático a desenvolver.

Dado o grande número de decisões envolvidas o sistema terá dois níveis. Um dos quais destinado ao planeamento global da empresa, e outro dedicado aos problemas de cada secção. A este nível surge a secção de montagem em que, devido à grande quantidade de mão de obra envolvida as variáveis não controláveis são muitas, aumentando os problemas em maximizar o seu desempenho.

A simulação surge então como uma ferramenta indispensável à análise de sistema de grande complexidade, em que os custos de pôr em funcionamento decisões erradas são demasiado prejudiciais. Será uttilizada nos dois níveis hierárquicos especificados.

Só com a integração dos vários módulos que constituem o sistema se conseguirá um controlo efectivo do mesmo. Por isso a integração dos módulos de planeamento global, balanceamento das linhas, simulação, monitorização e controlo da produção é fundamental.

Sem dúvida que um dos pontos em que são maiores os problemas a resolver e onde se pode melhorar o desempenho é no balanceamento das linhas de montagem. Foi por isso desenvolvido um sistema, ponto de partida para o sistema global a desenvolver futuramente, em que são utilizadas regras que permitem obter balanceamentos, e em que estes e outros, sugeridos pelo utilizador, possam ser testados e avaliados através da sua simulação.

Dos resultados obtidos para as características de fabrico de produtos da empresa pode concluir-se que:

- Não é possível determinar à partida qual das regras implementadas é a mais indicada para realizar futuramente os balanceamentos deste tipo de linhas. Observou-se, no entanto, que em todos os casos a configuração proposta pela Heurrística Multi-Regra acabou por ser sempre uma das que melhor desempenho registou.

- A importância do módulo de simulação na comparação e análise do desempenho das várias configurações de linha. Nestas condições de grande variabilidade a importância de uma ferramenta de simulação é notória na medida em que torna possível detectar a acumulação de peças entre postos de trabalho, e consequente detecção de estações gargalo, os tempos de utilização dos postos, e os dias necessários ao fabrico da totalidade dos produtos, informação indispensável para avaliar as configurações de linha alternativas.

- A atribuição de operárias aos postos de trabalho é um ponto fundamental para a obtenção de um bom balanceamento de linha, com menos perdas, menor acumulação de lotes em curso de fabrico entre postos de trabalho, e consequentemente melhores rendimentos para a linha.

- Na análise efectuada, com atribuição aleatória de operárias aos postos de trabalho, foi possível verificar que frequentemente o tempo necessário à produção da totalidade dos produtos baixou, chegando mesmo a verificar-se uma redução de 2

dias em 10. Resulta assim clara a importância do posterior desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerir esta atribuição que na análise efectuada foi deixada aleatória fundamentalmente para demonstrar a influência deste factor no desempenho global da linha.

Constata-se que a decisão de qual a configuração mais adequada a cada caso depende da avaliação de uma quantidade de características, algumas delas difíceis de quantificar, e que obrigam à intervenção do responsável pela tomada de decisões.

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento

O confronto com um problema concreto de um sistema de produção organizado em linhas de fabrico manuais, originou a motivação para este trabalho de análise dos problemas inerentes ao balanceamento de linhas, das linhas de acção para a obtenção do balanceamento mais adequado face à extrema variabilidade presente nesse tipo de sistemas, e da importância do recurso à simulação na avaliação de diferentes soluções e auxilio à tomada de decisões.

No planeamento e gestão de sistemas de produção organizados em linhas de fabrico são vários os problemas a enfrentar para atingir os objectivos pretendidos. Uma das fases determinantes ao bom funcionamento de uma linha de fabrico é a distribuição de modo equilibrado das operações a realizar para produzir o produto em questão pelos postos de trabalho, ou seja, o balanceamento da linha. A este nível são várias as perguntas a que se procura dar resposta, entre elas:

- Como devem as operações ser distribuídas pelos postos?
- Deve algum posto ser duplicado?
- Qual deve ser o tempo de ciclo?

Nem sempre é fácil encontrar a resposta a estas e outras questões. No que diz respeito à determinação de qual deve ser o tempo de ciclo, este é normalmente estabelecido com base na taxa de produção que se pretende para a linha. No entanto nem sempre a duração das operações permite que sejam distribuídas de modo equilibrado, surgindo frequentemente balanceamentos com perdas. São várias as restrições a influenciarem o balanceamento da linha, nomeadamente as durações das operações, as suas restrições de precedência e vizinhança.

Quando existem perdas de balanceamento além de não se conseguir atingir o rendimento pretendido, podem também surgir problemas a nível de acumulação de peças entre postos de trabalho, de estações que se encontram paradas por falta de peças, que não chegam dos postos antecedentes, ou por não poderem enviar peças para o postos seguinte por o seu armazém de peças à entrada já estar cheio.

A complexidade do problema de balanceamento de linhas de fabrico, que é do tipo NP-difícil, torna o recurso a regras heurísticas uma prática frequente. Algumas regras revelam-se mesmo capazes de encontrar a solução óptima em alguns tipos de problemas, além de serem facilmente adaptáveis a incluir restrições como as de precedência e vizinhança de operações.

As linhas de fabrico com forte componente de mão de obra tornam-se ainda mais complicadas de balancear, devido à variabilidade inerente ao comportamento humano. A este nível levantam-se ainda mais questões em que a resposta é normalmente difícil de encontrar, como sejam:

- ▷ Como devem ser as operárias distribuídas pelos postos de trabalho?
- ▷ Qual o tempo de duração das operações durante a fase de balanceamento da linha?

A complexidade em dar resposta a estas e outras questões do género deve-se ao facto das características do comportamento humano cuja predisposição à realização de determinada operação depende das condições físicas e psíquicas das operárias, que são variáveis ao longo de cada dia e de dia para dia, e da sua capacidade e nível de conhecimentos. Factores impossíveis de determinar e quantificar com exactidão.

Surge neste âmbito a simulação como uma ferramenta de auxílio à resolução dos problemas abordados. No que diz respeito ao problemas de balanceamento de linhas manuais a simulação permite a análise comparativa de resultados face às variações de rendimento das operárias, expressas normalmente em curvas de aprendizagem, possibilita a detecção de problemas como a acumulação de peças entre postos de trabalho, a existência de postos gargalo, a determinação dos tempos de utilização de cada posto e dos dias necessários ao fabrico da quantidade de produtos estabelecida. O fornecimento deste tipo de informação permite aos utilizadores da simulação avaliar as soluções encontradas auxiliando a sua tomada de decisões.

As fases que o desenvolvimento de um estudo de simulação compreende devem ser alvo de uma cuidadosa análise e elaboração para que os resultados obtidos sejam válidos. Uma das fases mais críticas para a validade de resultados é a elaboração de modelos que representem adequadamente o sistema em estudo..

As características das metodologias orientadas a objectos torna-as adequadas ao desenvolvimento de modelos de simulação. Aspectos como a organização da informação de modo hierárquico e as vantagens de extensibilidade e reutilização de *software*, além da fácil compreensão dos modelos por parte de quem não tem conhecimentos nesse campo, o que permite validar mais facilmente o modelo junto das pessoas que detêm melhor conhecimento sobre o sistema, são factores chave.

Dependente das características do sistema a simular está a determinação de qual o tipo de simulação mais adequado. O tipo mais adequado à simulação de linhas de fabrico é a simulação discreta de eventos, uma vez que o que é determinante é a modificação do estado do sistema face à ocorrência de determinados acontecimentos como, por exemplo, uma varia que obrigue à paragem de um posto ou a conclusão do processamento de um lote em determinado posto de trabalho.

Com o aumento do poder computacional e o desenvolvimento de *interfaces* gráficos agradáveis ao utilizador o recurso à simulação computorizada tem sido crescente. A este nível existem já várias ferramentas e ambientes de apoio ao desenvolvimento de simulações que reduzem em muito o esforço necessário tornando-se extremamente úteis.

No que diz respeito à simulação de eventos discretos são várias as ferramentas disponíveis. De entre elas salienta-se o Sim++, desenvolvido na Universidade da Florida e que faz parte do pacote SimPack, que além de ser muito flexível e ser desenvolvido seguindo uma metodologia orientada a objectos, com todas as vantagens inerentes, liberta o programador do mecanismo de organização dos eventos por ordem de ocorrência e do seu escalonamento ao longo do tempo. Trata-se de uma ferramenta muito útil e que contribui para a rapidez de desenvolvimento da simulação.

Da análise de uma indústria do sector das confecções resultou a estruturação e especificação de um sistema informático a desenvolver para apoio à tomada de decisões relativas ao planeamento e controlo da produção.

Dado o grande número de decisões envolvidas o sistema terá dois níveis. O primeiro dos quais, mais abrangente, será destinado ao planeamento global da empresa. O segundo nível terá componentes especificas à resolução dos problemas de cada secção. A este nível surge a secção de montagem em que, devido à grande quantidade de mão de obra envolvida as variáveis não controláveis são muitas, aumentando os problemas em maximizar o seu desempenho.

Os principais módulos que compõem o sistema especificado são

- um módulo de monitorização do estado fabril, que permita a recolha de informação actualizada sobre o desempenho atingido em cada instante e detecte os problemas que possam ocorrer, factor chave para que a tomada de decisões seja adequada face ao desempenho efectivo do sistema;
- um módulo de planeamento global em que são consideradas todas as secções e é feita a distribuição das ordens de fabrico, tendo em conta as capacidades e sobrecarga de cada uma, bem como a data de entrega dos produtos;
- um módulo de balanceamento que permita obter configurações para as linhas de montagem, posteriormente comparados com recurso à simulação;
- um módulo de simulação que possibilite a simulação de planeamentos e balanceamentos, com vista à análise e obtenção de informação que permita fundamentar a tomada de decisões;

Só com a integração dos vários módulos que constituem o sistema se conseguirá um controlo efectivo do mesmo.

Foram elaborados modelos do sistema seguindo uma metodologia orientada a objectos, a partir dos quais se pode evoluir para o seu desenvolvimento.

Uma vez que um dos pontos em que são maiores os problemas a resolver e onde se pode melhorar o desempenho é no balanceamento das linhas de montagem, foi por isso desenvolvido um sistema para balanceamento e simulação de linhas de fabrico, ponto de partida para o futuro sistema.

O sistema desenvolvido consiste na implementação de três regras heurísticas de balanceamento de linhas de fabrico, em que as configurações obtidas e as sugeridas pelo utilizador podem ser testadas, avaliadas e comparadas com recurso à simulação.

Das três regras implementadas aquela que registou melhores resultados foi a Heurística Multi-Regra, o que no entanto não justifica a eliminação das outras duas, uma vez que os testes realizados não foram muito extensos, além de que os resultados por elas obtidos muitas vezes foram idênticos ao da referida heurística.

De salientar a importância do módulo de simulação, sem o qual aspectos que determinam o bom desempenho global do funcionamento das linhas não poderiam ser avaliados. Alguns dos aspectos essenciais a serem avaliados são, por exemplo, os tempos de utilização, dias necessários

ao fabrico de todos os produtos, quantidade de peças que se acumulam entre os postos de trabalho.

Face à extrema variabilidade presente no sistema, e à dificuldade em quantificar aspectos como as aptidões e desempenho das operárias, o conhecimento dos responsáveis pela tomada de decisões a este nível revela-se fundamental na obtenção de boas soluções.

O conhecimento que detêm da operacionalidade e preferências das operárias da secção de montagem face às operações a realizar é um ponto muito importante. Por isso, uma das linhas de acção futuras será a tradução desse conhecimento em índices que reflictam as aptidões das operárias relativamente a cada tipo de operações.

O modo como as operárias são distribuídas pelos postos de trabalho, que constam da configuração de linha a implementar na prática, é um factor que influencia muito os rendimentos que se poderão obter. Por esse motivo, o desenvolvimento de um algoritmo que faça uma distribuição eficiente das operárias, tendo em conta os índices estabelecidos é um aspecto importante a integrar no sistema já elaborado.

Na análise efectuada, os balanceamentos obtidos foram também simulados após uma atribuição aleatória de operárias aos postos de trabalho. Mesmo assim, foi possível verificar que frequentemente o tempo necessário à produção da totalidade dos produtos baixou, chegando mesmo a verificar-se uma redução de 2 dias em 10, relativamente à simulação realizada considerando os tempos *standard* de duração das operações. Resulta deste modo clara a importância do desenvolvimento de um algoritmo capaz de gerir esta atribuição, que na análise efectuada foi deixada aleatória fundamentalmente para demonstrar a influência deste factor no desempenho global da linha.

O estudo de mais exemplos de produtos fabricados pela empresa recorrendo ao sistema desenvolvido, na tentativa de adaptar as regras de balanceamento às características de variabilidade das linhas, é um dos pontos a desenvolver futuramente.

Numa fase posterior o completar do sistema já desenvolvido com vista à realização do sistema integrado proposto, leva ao desenvolvimento dos restantes módulos. Um ponto chave para o sucesso do sistema é o desenvolvimento de *interfaces* gráficos amigáveis ao utilizador, que lhe permitam manipular facilmente o sistema e retirar daí a informação de que necessitam.

O desenvolvimento em linguagem orientada a objectos e a flexibilidade do sistema desenvolvido possibilitam a sua extensibilidade e reutilização noutras empresas.

Referências

[Anderson] Scott D. Anderson
"On-line Planning Simulation"
Spelman College, Atlanta

[Anderson, 95] Scott D. Anderson and Paul R. Cohen
"Segregating Planners and their Environments"
Computer Science Technical Report
1995

[Berard, 93] E. D. Berard
"Objetc Oriented Methodology"
The Object Agency, Inc.
1993

[Berard, 95] E. D. Berard
"A Comparision of Object-Oriented Development Methodologies"
The Object Agency, Inc.
1995

[Boctor, 95] Fayez F. Boctor
"A Multiple-rule Heuristic for Assembly Line Balancing"
Journal of the Operational Research Society
1995

[Bowman, 59] E. H. Bowman
"Assembly-Line Balancing by Linear Programming"
Massachusetts Institute of Tcchnology, Cambridge
November 1959

[Boyan Tech, 95] Boyan Tech, Inc.
"CPSim User's Guide and Reference Manual"
April 1995

[Cubert] Robert M. Cubert and Paul A. Fishwick
"Manual *Sim++ Versão 1.0"*
Department of Computer And Information Science and Engineering, University of Florida

[Dilworth, 92] James B. Dilworth
Operations Management Design, Planning, and Control for Manufacturing and Services
McGraw-Hill International Editions
1992

[Ferscha, 95] Alois Ferscha
"Parallel and Distributed Simulation of Discrete Event Systems"
University of Vienna, Austria
1995

[Fishman, 78] George S. Fishman
Principles of Discrete Event Simulation
John Wiley & Sons
1978

[Fishwick, 92 a)]] Paul A. Fishwick
"*An Integrated Approach to System Modelling using a Synthesis of Artificial Intelligence, Software Engineering and Simulation Methodologies"*
University of Florida
1992

[Fishwick, 92 b)] Paul A. Fishwick
"Simpack: Getting Started width Simulation Programming In C And C++"
Dept. of Computer & Information Science, University of Florida
1992

[Fishwick, 95 a)]] Paul A. Fishwick
"Computer Simulation: The Art and Science of Digital World Construction"
Computer & Information Science and Engineering Department, University of Florida
September 1995

[Fitzsimmons, 95] Edward A. Ftzsimmons and J. Dexter Fletcher
"Beyond DoD: Non-Defense Training and Education Applications of DIS"
Proceedings of the IEEE, vol. 83
August 1995

[Ghosh, 93] Kauhik Ghosh, Kiran Panesar, Richard M. Fujimoto and Karsten Schawn
"Ports: A Parallel, Optimistic, Real-Time Simulator"
College of Computing, Georgia Institute of Technology, Atlanta
December 1993

[Groover, 87] Mikell P. Groover
Automation, Production Systems, and Computer Inmtegrated Manufacturing
Prentice-Hall International, Inc.
1987

[Groselj] Bojan Groselj
"CPSim: A High-Performance Discrete-Event Simulation Tool"
Boyan Tech, Inc.

[Hanks, 93] Steve Hanks
"Benchmarks, Testbeds, Controlled Experimentation, and the Design og Agent Architectures"
Department of Computer Science & Engineering, University of Washington
July 1993

[Held, 62] Michael Held, Richerd M. Karp, and Richard Shareshian
"Assembly-Line Balancing-Dynamic Programming with Precedence Constraints"
International Business Machines Corporation, New York"
October 1962

[Hong, 93] Shuguang Hong, Geert van den Goor, Sjaak Brinkkemper
"A FormalApproach to the Comparison of Object-Oriented Analysis and Design Methodologies"
Proceedings of the 26th Hawaii International Conference on System Sciences
January 1993

[Hutt, 94] Andrew T. F. Hutt
Object Analysis and Design Description of Methods
John Wiley & Sons, Inc.

[Law, 82] Averill M. Law and W. David Kelton
Simulation Modeling and Analysis
McGraw-Hill Book Company
1992

[Lee, 93] Jin Joo Lee, William D. Norris II, and Paul A. Fishwick
"An Object-Oriented Multimodel Design for Integrating Simulation and Planning Tasks"
Department of Computer and Information Sciences,University of Florida
June 1993

[Little] M. C. Little and D. L. McCue
"Construction and Use of a Simulation Package in C++"
Department of Computing Science, University of Newcastle upon Tyne

[Ma] X. Ma, Beng, PhD and R.I. Nagieh, BSc
"A Simulation Based Planning Approach to flow Line Type Manufacturing with Mixed Product Models"
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering,
University of Bradford

[Mastor, 70] Anthony A. Mastor
"An Experimental Investigation and Comparative Evaluation of Production Line Balancing Techniques "
Management Science vol. 16
July 1970

[Mize, 68] Joe H. Mize and J. Grady Cox
Essentials of Simulation
Prentice-Hall
1968

[Praehofer] H. Praeofer, G. Jahn, W. Jacak, G. Hiader
"Supervising Manufacturing System Operation by DEVS-Based Intelligent Control"
Institute of Systems Science
Johannes Kepler University Linz, Austria

[Rumbaugh, 91]] James Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, W. Lorensen
Object-Oriented Modelling and Design
Prentice-Hall Internacional
1991

[Schroeder, 89] Roger G. Schroeder
Operations Management Decision Making in the Operations Function
McGraw-Hill Internacional Editions
1989

[Shiflett, 95] James E. Shiflett, W. H. Lunceford Jr, and Ruth Willis
"Application of Distributed Interactive Simulation Technology Within the Department of Defense"
Proceedings of the IEEE, vol. 83
August 1995

[Song] Alan A. Song and David L. Kleinman
"*A Distributed Simulation System for Team Decisionmaking*"
Department of Electrical and Systems Engineering, The University of Connecticut
1992

[Talbot, 84] F. Brian Talbot and James H. Patterson
"*An Integer Programming Algorithm with Network Cuts for Solving the Assembly Line Balacing Problem*"
Management Science vol. 30
January 1984

[Turner] Stephen J. Turner
"*A Portable Parallel Discrete Event Simulation System*"
Department of Computer Science, University of Exeter

[Wild, 72] Ray Wild
Mass-production Management The Design and Operation of Production Flow-line Systems
John Wiley & Sons, Inc.
1972

[Zeigler a)] Bernard P. Zeigler
"A Systems Methodology for Structuring Framilies of Models at Multiple Levels of Resolution"
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona

[Zeigler b)] Bernard P. Zeigler
"*Design of High Level Modelling/High Performance Simulation Environments*"
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona

[Zeigler c)] Bernard P. Zeigler
"Devs-c++: A High Performance Modelling and Simulation Environment"
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona

[Zeigler, 95 a)] Bernard P. Zeigler
"Objects and Systems: Principled Design with C++ Implementation"
1995

[Zeigler, 95 b)] Bernard P. Zeigler
"Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models"
Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizoma
1995

Anexo A

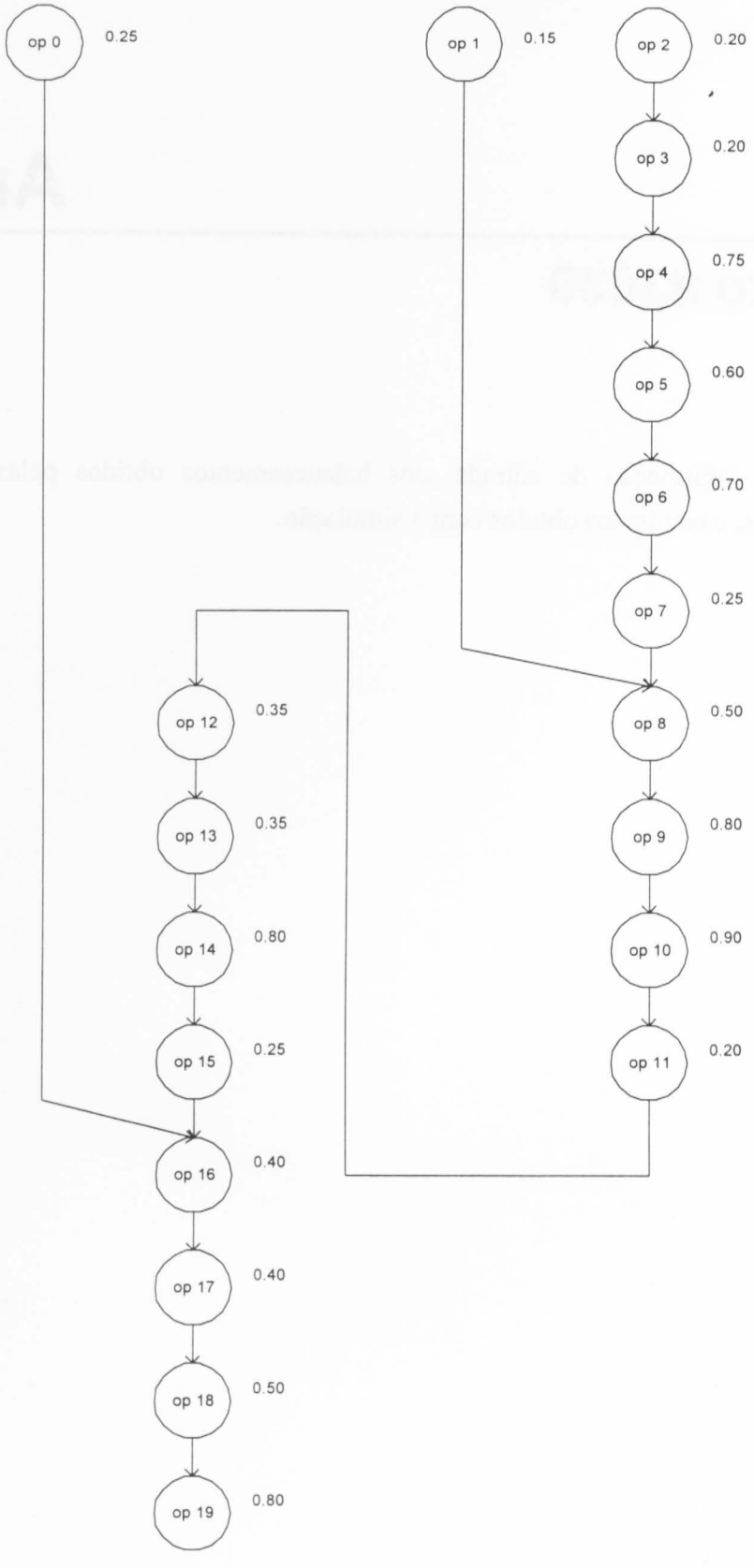
Produto #3030

Anexo A

Produto #3030

Descrição da informação de entrada, dos balanceamentos obtidos pelas regras heurísticas implementadas, e resultados obtidos com a simulação.

Grafo de Operações do Produto #3030



Informação de Entrada

```
Código da Ficha Técnica 1
Código do Produto 3030
Número de Lotes 50
Quantidade de produtos em cada lote 100
Número de operações necessárias ao fabrico 20
Número de ramos do grafo de operações 5
Tempo de cilco 0.59
Operações:
código; duração; op. seguinte; n° op. antecedentes; op. antecedentes; ramo;
inicial = 1
0-> 0.25 16 0 0 1
1-> 0.15 8 0 1 1
2-> 0.20 3 0 2 1
3-> 0.20 4 1 2 2 0
4-> 0.75 5 1 3 2 0
5-> 0.60 6 1 4 2 0
6-> 0.70 7 1 5 2 0
7-> 0.25 8 1 6 2 0
8-> 0.50 9 2 1 7 3 0
9-> 0.80 10 1 8 3 0
10-> 0.90 11 1 9 3 0
11-> 0.20 12 1 10 3 0
12-> 0.35 13 1 11 3 0
13-> 0.35 14 1 12 3 0
14-> 0.80 15 1 13 3 0
15-> 0.25 16 1 14 3 0
16-> 0.40 17 2 0 15 4 0
17-> 0.40 18 1 16 4 0
18-> 0.50 19 1 17 4 0
19-> 0.80 -1 1 18 4 0
```

Análise para o tempo de ciclo especificado pela sede.

Heurística Multi-Regra / Método dos Pesos Posionais

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 16
Cod do posto: 1
Num operações: 3
Operação: 2
Operação: 3
Operação: 1
Cod do posto: 2
Num operações: 1
Operação: 4
Cod do posto: 3
Num operações: 2
```

```
Operação: 5
Operação: 0
Cod do posto: 4
Num operações:: 1
Operação: 6
Cod do posto: 5
Num operações:: 1
Operação: 7
Cod do posto: 6
Num operações:: 1
Operação: 8
Cod do posto: 7
Num operações:: 1
Operação: 9
Cod do posto: 8
Num operações:: 1
Operação: 10
Cod do posto: 9
Num operações:: 2
Operação: 11
Operação: 12
Cod do posto: 10
Num operações:: 1
Operação: 13
Cod do posto: 11
Num operações:: 1
Operação: 14
Cod do posto: 12
Num operações:: 1
Operação: 15
Cod do posto: 13
Num operações:: 1
Operação:16
Cod do posto: 14
Num operações:: 1
Operação: 17
Cod do posto: 15
Num operações:: 1
Operação: 18
Cod do posto: 16
Num operações:: 1
Operação: 19
Perdas teóricas de balanceamento da linha: 4.686440
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico: 7
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 3345.000090
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 62.4%
Arrival Rate: 0.044843, Throughput: 0.014948
Mean Service Time per Token: 41.718750
Mean # of Tokens in System: 72.014948    Largest FEL size was 14
Mean Residence Time for each Token: 4817.800141
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 17.8%, Util: 82.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
```

```
F 2 (posto): Idle: 43.9%, Util: 56.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 17.8%, Util: 82.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle: 47.7%, Util: 52.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 62.6%, Util: 37.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 25.3%, Util: 74.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 40.2%, Util: 59.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 32.7%, Util: 67.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 17.8%, Util: 82.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 10 (posto): Idle: 47.7%, Util: 52.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 40.2%, Util: 59.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 62.6%, Util: 37.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 13 (posto): Idle: 40.2%, Util: 59.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 14 (posto): Idle: 40.2%, Util: 59.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 15 (posto): Idle: 25.3%, Util: 74.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 16 (posto): Idle: 40.2%, Util: 59.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:6
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 2922.038301
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 56.9%
Arrival Rate: 0.051334, Throughput: 0.017111
Mean Service Time per Token: 33.232563
Mean # of Tokens in System: 79.310870    Largest FEL size was 16
Mean Residence Time for each Token: 4634.988013
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 24.7%, Util: 75.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle: 50.8%, Util: 49.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 31.4%, Util: 68.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle: 52.1%, Util: 47.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 71.2%, Util: 28.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 25.3%, Util: 74.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 7 (posto): Idle: 47.4%, Util: 52.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 32.4%, Util: 67.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 9 (posto): Idle: 17.0%, Util: 83.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 10 (posto): Idle: 48.7%, Util: 51.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 41.4%, Util: 58.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 63.2%, Util: 36.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 13 (posto): Idle: 58.1%, Util: 41.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 14 (posto): Idle: 47.4%, Util: 52.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 15 (posto): Idle: 23.4%, Util: 76.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 16 (posto): Idle: 55.9%, Util: 44.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Regra do Maior Candidato

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 16
Cod do posto: 1
```

```
Num operações: 2
Operação: 0
Operação: 2
Cod do posto: 2
Num operações: 2
Operação: 3
Operação: 4
Cod do posto: 3
Num operações: 2
Operação: 5
Operação: 1
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 6
Cod do posto: 5
Num operações: 1
Operação: 7
Cod do posto: 6
Num operações: 1
Operação: 8
Cod do posto: 7
Num operações: 1
Operação: 9
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 9
Num operações: 2
Operação: 11
Operação: 12
Cod do posto: 10
Num operações: 1
Operação: 13
Cod do posto: 11
Num operações: 1
Operação: 14
Cod do posto: 12
Num operações: 1
Operação: 15
Cod do posto: 13
Num operações: 1
Operação: 16
Cod do posto: 14
Num operações: 1
Operação: 17
Cod do posto: 15
Num operações: 1
Operação: 18
Cod do posto: 16
Num operações: 1
Operação: 19
Perdas teóricas de balanceamento da linha: 4.686440
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
| SimPack SIMULATION REPORT |
Dias em fabrico:7
Total Simulation Time: 3470.000002
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
```

```
----------------------
System Utilization: 60.1%
Arrival Rate: 0.043228, Throughput: 0.014409
Mean Service Time per Token: 41.718750
Mean # of Tokens in System: 88.690922    Largest FEL size was 15
Mean Residence Time for each Token: 6155.149993
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 35.2%, Util: 64.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 17.1%, Util: 82.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 11
F 3 (posto): Idle: 35.2%, Util: 64.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle: 49.6%, Util: 50.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 64.0%, Util: 36.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 28.0%, Util: 72.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 42.4%, Util: 57.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 35.2%, Util: 64.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 20.7%, Util: 79.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 10 (posto): Idle: 49.6%, Util: 50.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 42.4%, Util: 57.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 64.0%, Util: 36.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 13 (posto): Idle: 42.4%, Util: 57.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 14 (posto): Idle: 42.4%, Util: 57.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 15 (posto): Idle: 28.0%, Util: 72.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 16 (posto): Idle: 42.4%, Util: 57.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:6
+---------------------------+
| SimPack SIMULATION REPORT |
+---------------------------+
Total Simulation Time: 2917.038302
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 56.9%
Arrival Rate: 0.051422, Throughput: 0.017141
Mean Service Time per Token: 33.198685
Mean # of Tokens in System: 91.084340    Largest FEL size was 15
Mean Residence Time for each Token: 5313.930186
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 38.3%, Util: 61.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 24.5%, Util: 75.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 9
F 3 (posto): Idle: 44.3%, Util: 55.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle: 52.0%, Util: 48.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 71.3%, Util: 28.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 25.2%, Util: 74.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 47.3%, Util: 52.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 32.4%, Util: 67.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 16.9%, Util: 83.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 4
F 10 (posto): Idle: 48.6%, Util: 51.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 41.3%, Util: 58.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 63.1%, Util: 36.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 13 (posto): Idle: 58.0%, Util: 42.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 14 (posto): Idle: 47.3%, Util: 52.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 15 (posto): Idle: 23.5%, Util: 76.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 16 (posto): Idle: 55.8%, Util: 44.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Análise para o tempo de ciclo determinado pela duração da maior operação.

Heurística Multi-Regra / Método dos Pesos Posionais / Regra do Maior Candidato

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 12
Cod do posto: 1
Num operações: 4
Operação: 2
Operação: 3
Operação: 0
Operação: 1
Cod do posto: 2
Num operações: 1
Operação: 4
Cod do posto: 3
Num operações: 1
Operação: 5
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 6
Cod do posto: 5
Num operações: 2
Operação: 7
Operação: 8
Cod do posto: 6
Num operações: 1
Operação: 9
Cod do posto: 7
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 8
Num operações: 3
Operação: 11
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 9
Num operações: 1
Operação: 14
Cod do posto: 10
Num operações: 2
Operação: 15
Operação: 16
Cod do posto: 11
Num operações: 2
Operação: 17
Operação: 18
Cod do posto: 12
Num operações: 1
```

```
Operação: 19
Perdas de balanceamento da linha: 1.611111
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:11
+--------------------------+
| SimPack SIMULATION REPORT |
+--------------------------+
Total Simulation Time: 5345.000005
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 72.9%
Arrival Rate: 0.028064, Throughput: 0.009355
Mean Service Time per Token: 77.916667
Mean # of Tokens in System: 75.422824    Largest FEL size was 14
Mean Residence Time for each Token: 8062.699945
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 25.2%, Util: 74.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 2 (posto): Idle: 29.8%, Util: 70.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 43.9%, Util: 56.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 34.5%, Util: 65.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 29.8%, Util: 70.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 25.2%, Util: 74.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 15.8%, Util: 84.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 8 (posto): Idle: 15.8%, Util: 84.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 25.2%, Util: 74.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 39.2%, Util: 60.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 15.8%, Util: 84.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 25.2%, Util: 74.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:10
+--------------------------+
| SimPack SIMULATION REPORT |
+--------------------------+
Total Simulation Time: 4871.379058
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 67.7%
Arrival Rate: 0.030792, Throughput: 0.010264
Mean Service Time per Token: 66.003787
Mean # of Tokens in System: 80.749602    Largest FEL size was 14
Mean Residence Time for each Token: 7867.238444
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 34.3%, Util: 65.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 2 (posto): Idle: 40.4%, Util: 59.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 53.9%, Util: 46.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 42.5%, Util: 57.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 45.7%, Util: 54.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 25.4%, Util: 74.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 7 (posto): Idle: 28.1%, Util: 71.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
```

```
F 8 (posto): Idle: 14.5%, Util: 85.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 9 (posto): Idle: 23.7%, Util: 76.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 38.9%, Util: 61.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 15.2%, Util: 84.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 24.4%, Util: 75.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Configuração Sugerida

```
Tamanho da linhha: 12
Cod do posto: 1
Num operações:: 3
Operação: 1
Operação: 2
Operação: 3
Cod do posto: 2
Num operações:: 1
Operação: 4
Cod do posto: 3
Num operações:: 1
Operação: 5
Cod do posto: 4
Num operações:: 1
Operação: 6
Cod do posto: 5
Num operações:: 2
Operação: 0
Operação: 7
Cod do posto: 6
Num operações:: 2
Operação: 8
Operação: 9
Cod do posto: 7
Num operações:: 2
Operação: 10
Operação: 11
Cod do posto: 8
Num operações:: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 9
Num operações:: 2
Operação: 14
Operação: 15
Cod do posto: 10
Num operações:: 2
Operação: 16
Operação: 17
Cod do posto: 11
Num operações:: 1
Operação: 18
Cod do posto: 12
Num operações:: 1
Operação: 19
```

Simulação comm operárias atribuidas

```
Dias em fabricco:8
| SimPack SIMUULATION REPORT |
```

Produto #3030

```
Total Simulation Time: 4111.455696
Total System Arrivals: 150
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 64.2%
Arrival Rate: 0.036483, Throughput: 0.012161
Mean Service Time per Token: 52.796933
Mean # of Tokens in System: 93.759692    Largest FEL size was 13
Mean Residence Time for each Token: 7709.776430
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 42.1%, Util: 57.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle: 18.6%, Util: 81.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 14
F 3 (posto): Idle: 36.5%, Util: 63.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 25.5%, Util: 74.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 54.4%, Util: 45.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 6 (posto): Idle: 26.7%, Util: 73.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 37.8%, Util: 62.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 22.5%, Util: 77.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 9 (posto): Idle: 41.8%, Util: 58.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 56.2%, Util: 43.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 55.1%, Util: 44.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 12.3%, Util: 87.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
```

Anexo B

Produto #3830

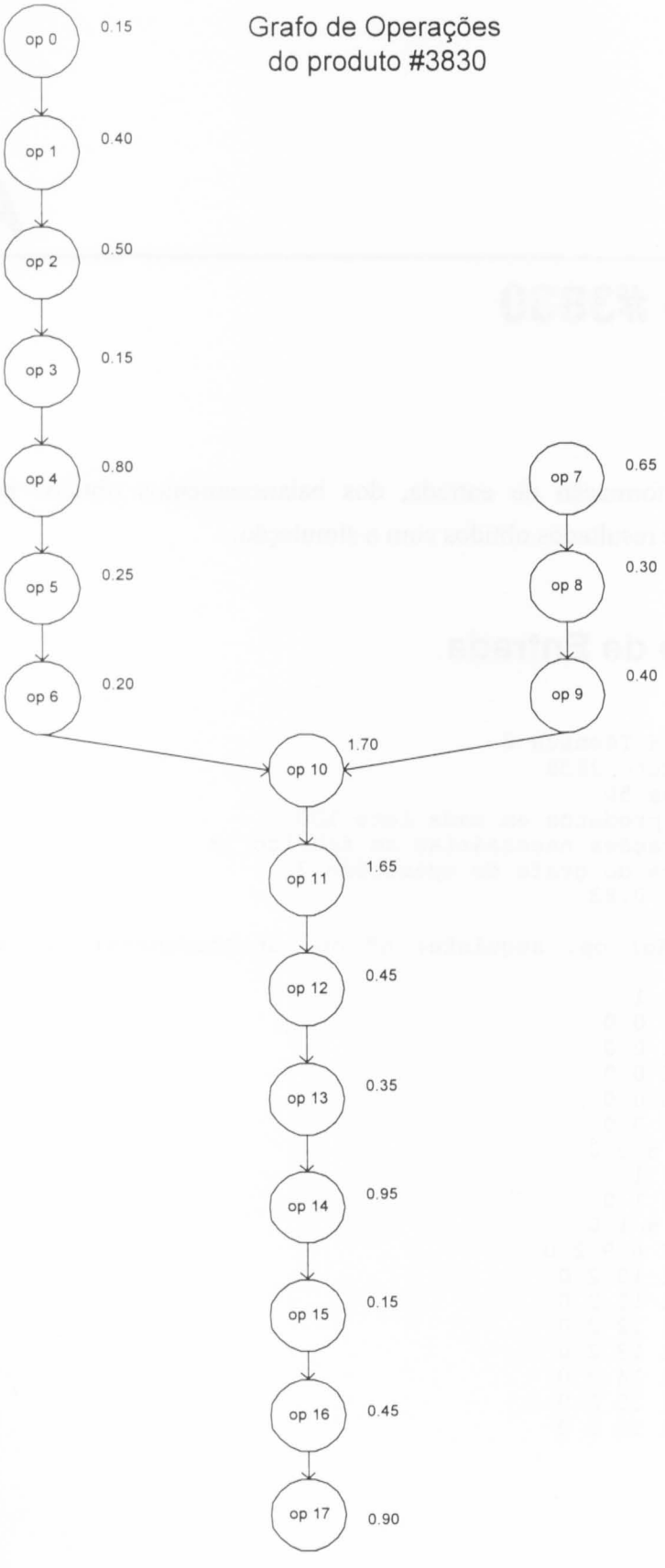
Anexo B

Produto #3830

Descrição da informação de entrada, dos balanceamentos obtidos pelas regras heurísticas implementadas, e resultados obtidos com a simulação.

Informação de Entrada

```
Código da Ficha Técnica 2
Código do Produto 3830
Número de Lotes 50
Quantidade de produtos em cada lote 100
Número de operações necessárias ao fabrico 18
Número de ramos do grafo de operações 3
Tempo de cilco 0.83
Operações:
código; duração; op. seguinte; nº op. antecedentes; op. antecedentes; ramo;
inicial = 1
0-> 0.15 1 0 0 1
1-> 0.40 2 1 0 0 0
2-> 0.50 3 1 1 0 0
3-> 0.15 4 1 2 0 0
4-> 0.80 5 1 3 0 0
5-> 0.25 6 1 4 0 0
6-> 0.20 10 1 5 0 0
7-> 0.65 8 0 1 1
8-> 0.30 9 1 7 1 0
9-> 0.40 10 1 8 1 0
10-> 1.70 11 2 6 9 2 0
11-> 1.65 12 1 10 2 0
12-> 0.45 13 1 11 2 0
13-> 0.35 14 1 12 2 0
14-> 0.95 15 1 13 2 0
15-> 0.15 16 1 14 2 0
16-> 0.45 17 1 15 2 0
17-> 0.90 -1 1 16 2 0
```


Grafo de Operações
do produto #3830
op 0
0.15
op 1
0.40
op 2
0.50
op 3
0.15
op 4
0.80
op 5
0.25
op 6
0.20
op 7
0.65
op 8
0.30
op 9
0.40
op 10
1.70
op 11
1.65
op 12
0.45
op 13
0.35
op 14
0.95
op 15
0.15
op 16
0.45
op 17
0.90

Análise para o tempo de ciclo especificado pela sede.

Heurística Multi-Regra / Regra do Maior Candidato

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 11
Cod do posto: 1
Num operações: 2
Operação: 7
Operação: 0
Cod do posto: 2
Num operações: 2
Operação: 1
Operação: 8
Cod do posto: 3
Num operações: 2
Operação: 2
Operação: 3
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 4
Cod do posto: 5
Num operações: 2
Operação: 5
Operação: 9
Cod do posto: 6
Num operações: 2
Operação: 6
Operação: 10
Cod do posto: 7
Num operações: 1
Operação: 11
Cod do posto: 8
Num operações: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 9
Num operações: 2
Operação: 14
Operação: 15
Cod do posto: 10
Num operações: 1
Operação: 16
Cod do posto: 11
Num operações: 1
Operação: 17
Perdas de balanceamento da linha: 1.927711
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:10
```

```
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 4715.000005
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 72.6%
Arrival Rate: 0).021209, Throughput: 0.010604
Mean Service Time per Token: 68.454546
Mean # of Tokens in System: 37.541887    Largest FEL size was 11
Mean Residence Time for each Token: 3540.199963
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 15.2%, Util: 84.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 25.8%, Util: 74.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 3 (posto): Idle: 31.1%, Util: 68.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 15.2%, Util: 84.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 31.1%, Util: 68.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 6 (posto): Idle: 18.3%, Util: 81.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 12.0%, Util: 88.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 8 (posto): Idle: 15.2%, Util: 84.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 33.2%, Util: 66.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 52.3%, Util: 47.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 52.3%, Util: 47.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:8
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 4115.233581
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 68.7%
Arrival Rate: 0.024300, Throughput: 0.012150
Mean Service Time per Token: 56.539676
Mean # of Tokens in System: 39.845130    Largest FEL size was 12
Mean Residence Time for each Token: 3279.440313
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 22.2%, Util: 77.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 34.2%, Util: 65.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 3 (posto): Idle: 40.9%, Util: 59.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 22.2%, Util: 77.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 5 (posto): Idle: 44.9%, Util: 55.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 6 (posto): Idle: 15.4%, Util: 84.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 5
F 7 (posto): Idle: 21.6%, Util: 78.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 8 (posto): Idle: 11.2%, Util: 88.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 9 (posto): Idle: 29.9%, Util: 70.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 50.9%, Util: 49.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 50.9%, Util: 49.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Produto #3830

Método dos Pesos Posicionais

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 12
Cod do posto: 1
Num operações: 2
Operação: 0
Operação: 1
Cod do posto: 2
Num operações: 2
Operação: 2
Operação: 3
Cod do posto: 3
Num operações: 1
Operação: 7
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 4
Cod do posto: 5
Num operações: 3
Operação: 8
Operação: 5
Operação: 6
Cod do posto: 6
Num operações: 1
Operação: 9
Cod do posto: 7
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 11
Cod do posto: 9
Num operações: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 10
Num operações: 2
Operação: 14
Operação: 15
Cod do posto: 11
Num operações: 1
Operação: 16
Cod do posto:12
Num operações: 1
Operação: 17
Perdas de balanceamento da linha: 2.927711
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:10
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 4710.000003
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
```

```
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 66.6%
Arrival Rate: 0.021231, Throughput: 0.010616
Mean Service Time per Token: 62.750000
Mean # of Tokens in System: 47.618896    Largest FEL size was 12
Mean Residence Time for each Token: 4485.699982
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 41.6%, Util: 58.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 31.0%, Util: 69.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 8
F 3 (posto): Idle: 31.0%, Util: 69.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 15.1%, Util: 84.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 10
F 5 (posto): Idle: 20.4%, Util: 79.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 6 (posto): Idle: 57.5%, Util: 42.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 39.5%, Util: 60.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 8 (posto): Idle: 11.9%, Util: 88.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 9 (posto): Idle: 15.1%, Util: 84.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 10 (posto): Idle: 33.1%, Util: 66.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 52.2%, Util: 47.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 52.2%, Util: 47.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:9
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 4231.180285
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 61.3%
Arrival Rate: 0.023634, Throughput: 0.011817
Mean Service Time per Token: 51.868733
Mean # of Tokens in System: 51.231214    Largest FEL size was 12
Mean Residence Time for each Token: 4335.370031
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 48.0%, Util: 52.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 41.0%, Util: 59.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 3 (posto): Idle: 43.6%, Util: 56.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle: 24.4%, Util: 75.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 11
F 5 (posto): Idle: 38.9%, Util: 61.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 6 (posto): Idle: 58.8%, Util: 41.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 7 (posto): Idle: 47.8%, Util: 52.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 10.8%, Util: 89.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 7
F 9 (posto): Idle: 13.6%, Util: 86.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 10 (posto): Idle: 33.3%, Util: 66.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 11 (posto): Idle: 52.2%, Util: 47.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 12 (posto): Idle: 52.2%, Util: 47.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Produto #3830

Análise para tempo de ciclo determinado pela duração da maior operação.

Heurística Multi-Regra

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 8
Cod do posto: 1
Num operações: 4
Operação: 7
Operação: 8
Operação: 0
Operação: 1
Cod do posto: 2
Num operações: 4
Operação: 2
Operação: 3
Operação: 4
Operação: 5
Cod do posto: 3
Num operações: 2
Operação: 9
Operação: 6
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 5
Num operações: 1
Operação: 11
Cod do posto: 6
Num operações: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 7
Num operações: 3
Operação: 14
Operação: 15
Operação: 16
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 17
Perdas de balanceamento da linha: 1.882353
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:18
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 9270.000115
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
```

```
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 70.1%
Arrival Rate: 0.010787, Throughput: 0.005394
Mean Service Time per Token: 130.000001
Mean # of Tokens in System: 38.748112    Largest FEL size was 8
Mean Residence Time for each Token: 7183.900042
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 19.1%, Util: 80.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle:  8.3%, Util: 91.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 3 (posto): Idle: 67.6%, Util: 32.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle:  8.3%, Util: 91.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 5 (posto): Idle: 11.0%, Util: 89.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 56.9%, Util: 43.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 16.4%, Util: 83.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 51.5%, Util: 48.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:15
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 7410.339311
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 71.2%
Arrival Rate: 0.013495, Throughput: 0.006747
Mean Service Time per Token: 105.560179
Mean # of Tokens in System: 38.607773    Largest FEL size was 9
Mean Residence Time for each Token: 5721.933978
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 19.0%, Util: 81.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle:  9.9%, Util: 90.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 5
F 3 (posto): Idle: 68.8%, Util: 31.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 4 (posto): Idle:  8.2%, Util: 91.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 5 (posto): Idle: 16.5%, Util: 83.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 48.5%, Util: 51.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 17.5%, Util: 82.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 41.8%, Util: 58.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Método dos Pesos Posicionais

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 8
Cod do posto: 11
Num operações:  4
Operação: 0
Operação: 1
Operação: 2
```

Produto #3830

```
Operação: 3
Cod do posto: 2
Num operações: 3
Operação: 7
Operação: 4
Operação: 5
Cod do posto: 3
Num operações: 3
Operação: 8
Operação: 9
Operação: 6
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 5
Num operações: 1
Operação: 11
Cod do posto: 6
Num operações: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 7
Num operações: 3
Operação: 14
Operação: 15
Operação: 16
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 17
Perdas de balanceamento da linha: 1.882353
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:24
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 12380.000003
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 52.5%
Arrival Rate: 0.008078, Throughput: 0.004039
Mean Service Time per Token: 130.000001
Mean # of Tokens in System: 46.213651    Largest FEL size was 8
Mean Residence Time for each Token: 11442.499960
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 51.5%, Util: 48.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 31.3%, Util: 68.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 5
F 3 (posto): Idle: 63.7%, Util: 36.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 3
F 4 (posto): Idle: 31.3%, Util: 68.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 18
F 5 (posto): Idle: 33.4%, Util: 66.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 67.7%, Util: 32.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 37.4%, Util: 62.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 63.7%, Util: 36.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:19
```

```
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 9644.473746
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 54.9%
Arrival Rate: 0..010369, Throughput: 0.005184
Mean Service Time per Token: 105.948067
Mean # of Tokens in System: 45.724914    Largest FEL size was 8
Mean Residence Time for each Token: 8819.854607
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 50.2%, Util: 49.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 1
F 2 (posto): Idle: 30.8%, Util: 69.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 4
F 3 (posto): Idle: 63.8%, Util: 36.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 4 (posto): Idle: 29.5%, Util: 70.5%, Preemptions: 0, LongestQ: 17
F 5 (posto): Idle: 34.9%, Util: 65.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 60.0%, Util: 40.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 36.4%, Util: 63.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 54.9%, Util: 45.1%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Regra do Maior Candidato

Configuração da Linha:

```
Tamanho da linha: 8
Cod do posto: 1
Num operações: 4
Operação: 7
Operação: 8
Operação: 9
Operação: 0
od do posto: 2
Num operações: 3
Operação: 1
Operação: 2
Operação: 3
Cod do posto: 3
Num operações: 3
Operação: 4
Operação: 5
Operação: 6
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 10
Cod do posto: 5
Num operações: 1
Operação: 11
Cod do posto: 6
Num operações: 2
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 7
Num operações: 3
Operação: 14
Operação: 15
```

```
Operação: 16
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 17
Perdas de balanceamento da linha: 1.882353
```

Simulação com tempos standard de duração das operações

```
Dias em fabrico:18
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 9235.000003
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 70.4%
Arrival Rate: 0.010828, Throughput: 0.005414
Mean Service Time per Token: 130.000001
Mean # of Tokens in System: 38.743367    Largest FEL size was 8
Mean Residence Time for each Token: 7155.899869
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 18.8%, Util: 81.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle: 43.2%, Util: 56.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 32.3%, Util: 67.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle:  8.0%, Util: 92.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 5 (posto): Idle: 10.7%, Util: 89.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 56.7%, Util: 43.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 16.1%, Util: 83.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 51.3%, Util: 48.7%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Simulação após atribuição de operárias aos postos de trabalho

```
Dias em fabrico:15
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 7402.880908
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 71.2%
Arrival Rate: 0.013508, Throughput: 0.006754
Mean Service Time per Token: 105.402000
Mean # of Tokens in System: 38.759109    Largest FEL size was 9
Mean Residence Time for each Token: 5738.581406
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 19.0%, Util: 81.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle: 44.4%, Util: 55.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 3 (posto): Idle: 35.0%, Util: 65.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 4 (posto): Idle:  8.1%, Util: 91.9%, Preemptions: 0, LongestQ: 6
F 5 (posto): Idle: 16.4%, Util: 83.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 6 (posto): Idle: 48.4%, Util: 51.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 7 (posto): Idle: 17.4%, Util: 82.6%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 41.7%, Util: 58.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

Configuração Sugerida

```
Tamanho da linha: 9
Cod do posto: 1
Num operações: 3
Operação: 0
Operação: 6
Operação: 8
Cod do posto: 2
Num operações: 2
Operação: 1
Operação: 2
Cod do posto: 3
Num operações: 3
Operação: 3
Operação: 4
Operação: 5
Cod do posto: 4
Num operações: 1
Operação: 7
Cod do posto: 5
Num operações: 2
Operação: 9
Operação: 10
Cod do posto: 6
Num operações: 3
Operação: 11
Operação: 12
Operação: 13
Cod do posto: 7
Num operações: 2
Operação: 14
Operação: 15
Cod do posto: 8
Num operações: 1
Operação: 16
Cod do posto: 9
Num operações: 1
Operação: 17
```

Simulação com operárias atribuidas

```
Dias em fabrico:12
| SimPack SIMULATION REPORT |
Total Simulation Time: 6098.887430
Total System Arrivals: 100
Total System Departures: 50
System Wide Statistics
----------------------
System Utilization: 56.9%
Arrival Rate: 0.016396, Throughput: 0.008198
Mean Service Time per Token: 69.397382
Mean # of Tokens in System: 59.993504    Largest FEL size was 10
Mean Residence Time for each Token: 7317.872591
Facility Statistics
-------------------
F 1 (posto): Idle: 60.0%, Util: 40.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 2
F 2 (posto): Idle: 33.2%, Util: 66.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 30
F 3 (posto): Idle: 57.8%, Util: 42.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

```
F 4 (posto): Idle: 55.2%, Util: 44.8%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 5 (posto): Idle: 20.6%, Util: 79.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 18
F 6 (posto): Idle:  6.7%, Util: 93.3%, Preemptions: 0, LongestQ: 7
F 7 (posto): Idle: 57.0%, Util: 43.0%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 8 (posto): Idle: 66.8%, Util: 33.2%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
F 9 (posto): Idle: 30.6%, Util: 69.4%, Preemptions: 0, LongestQ: 0
```

FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO
BIBLIOTECA
0000067162