

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Sílvio do Carmo Silva com quem tive o privilégio de trabalhar durante os últimos anos. Pela sua inspiração, empenho e paciência na orientação científica desta tese, mas também pelo seu apoio e amizade que muito estimo e agradeço.

À Universidade do Minho por todos os meios disponibilizados.

À Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco que, apesar de não me ter podido dispensar de serviço docente durante o período da investigação, sempre me proporcionou o maior apoio para poder realizar este trabalho.

À minha família, namorada e amigos pelo seu apoio incondicional e compreensão.

N.O. Fernandes

Resumo

Contribuições para o Controlo da Actividade de Produção no Sector de Produção por Encomenda

O Controlo da Actividade de Produção (CAP) é uma função de importância estratégica para o sucesso económico das empresas industriais. Este incide sobre duas vertentes de decisão fundamentais: a de lançamento de trabalhos para a produção e a de controlo do fluxo de materiais. Esta tese estuda a primeira na óptica do controlo da carga - Workload Control (WLC) e a segunda na óptica do paradigma *push*. Neste contexto, desenvolveu-se um modelo genérico capaz de configurar uma variedade considerável de mecanismos de CAP pela sua conveniente parametrização. Adicionalmente, concebeu-se um novo mecanismo de CAP baseado em WLC, designado de gPOLCA. O mecanismo é adequado para aplicação no sector de produção por encomenda e baseado no mecanismo POLCA de *Quick Response Manufacturing*, desenvolvido por Suri (1998). Num estudo comparativo, o mecanismo gPOLCA mostrou melhor desempenho do que outros vulgarmente utilizados na prática industrial, incluindo o POLCA. Numa outra direcção de investigação relacionada, analisou-se a influência de algumas estratégias de CAP, assim como de alguns parâmetros de lançamento, no desempenho dos mecanismos de WLC. Isto foi motivado, por um lado, pela diversidade de mecanismos de WLC que têm sido desenvolvidos por diversos autores e, por outro, pela dificuldade de cabalmente compreender o seu comportamento, quando vistos como um todo. Assim, estudaram-se três instâncias de duas configurações típicas, nomeadamente *job shop* e *flow shop*. Os resultados mostraram que as estratégias de CAP de dimensões, como o controlo da carga no sistema e a contabilização da carga ao longo do tempo, e que os valores de parâmetros de lançamento, como o intervalo de tempo entre lançamentos, a janela temporal de lançamentos e os limites de carga, podem influenciar significativamente o desempenho dos mecanismos de WLC. Verificou-se, ainda, que os parâmetros de lançamento são particularmente sensíveis a perturbações no sistema

produtivo decorrentes de alterações na distribuição do intervalo entre chegadas ao sistema, na distribuição dos tempos de processamento e na carga do sistema. Os resultados obtidos podem claramente orientar a prática industrial de CAP, alertando para a particular atenção que deve ser dada à selecção dos valores dos parâmetros de lançamento e indicando estratégias importantes a ter em conta. No estudo experimental realizado usaram-se modelos de simulação por computador desenvolvidos em ARENA e planos de experimentação para análise da robustez das estratégias e dos parâmetros considerados a perturbações no sistema produtivo, baseados na metodologia de Taguchi.

Abstract

Contributions to the Production Activity Control in the Make to Order Sector

The Production Activity Control (PAC) is of strategic importance for the economical success of industrial companies. Two important interrelated functions of PAC are the job release function and the materials flow control function. This thesis addresses both: the former with basis on the theory of Workload Control (WLC), and the latter by applying the push paradigm. Thus, initially a generic model was devised, capable of configuring a variety of PAC mechanisms through adequate model parameterization. Additionally, a new WLC based PAC mechanism, called gPOLCA, was developed for the make-to-order (MTO) production environment. This is based on the POLCA mechanism for Quick Response Manufacturing put forward by Suri (1988). In a comparative experimental study, production systems performance under gPOLCA control was better than under other PAC mechanisms commonly used in practice, including POLCA. Another related direction of investigation addressed the influence of some control strategies and releasing parameters on WLC mechanisms performance. This was motivated by the difficulty of fully understanding the performance behaviour of WLC mechanisms, seen as a whole, that have been put forward by many authors. Thus, the performance of three production system instances of two typical configurations, namely the job shop and the flow shop, were studied. Results show that both, the control strategies of dimensions, such as workload control and workload accounting over time and the values of the releasing parameters, such as the time interval between job releases, the releasing temporal window and the load limits, can have a great impact on the WLC mechanisms performance. In addition, it was observed that the releasing parameters are particularly sensitive to system perturbations related with the interarrival times distribution, the processing times distribution and the system workload. The results obtained can be of great help for the PAC function in practice, emphasizing the special attention that must be given to the choice of the releasing

parameters and pointing out important strategies that must be taken into account. The experimental study was carried out using ARENA simulation models and experimental settings, for robustness analysis of the releasing parameters and PAC strategies to systems perturbations, based on the Taguchi methodology.

Índice Geral

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	vi
Índice Geral.....	viii
Lista de Siglas e Acrónimos	xi
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Contexto de investigação	2
1.2 Objectivos e questões de investigação	7
1.3 Organização da tese	8
Capítulo 2 O Conceito Workload Control	11
2.1 Relação entre carga e tempo de percurso num centro de trabalho	12
2.2 Controlo das entradas e saídas a diferentes níveis hierárquicos.....	15
2.2.1 Entrada.....	16
2.2.2 Lançamento	16
2.2.3 Despacho	18
2.3 Conceitos clássicos de WLC	18
2.3.1 Load Oriented Order Release (LOOR).....	22
2.4 Características e aplicabilidade do WLC.....	26
Capítulo 3 Mecanismos de Controlo da Actividade de Produção: revisão e classificação	29
3.1 Mecanismos de controlo da actividade de produção	30
3.2 Dimensões dos mecanismos de controlo da actividade de produção	35
3.2.1 Lançamento	36
3.2.2 Controlo do fluxo de materiais	38

3.2.3 Convenção temporal.....	39
3.2.4 Medição da carga.....	40
3.2.5 Agregação da carga	40
3.2.6 Contabilização da carga ao longo do tempo.....	41
3.2.7 Controlo da carga	43
3.2.8 Visibilidade do programa de lançamentos planeados.....	44
3.2.9 Planeamento da capacidade.....	44
3.3 Modelo genérico de WLC	47
3.4 Conclusões sumárias	52
Capítulo 4 Comportamento dos Mecanismos de WLC.....	55
4.1. Trabalho anterior	57
4.2 Metodologia de investigação.....	62
4.2.1 Modelo.....	63
4.2.2 Medidas de desempenho.....	67
4.2.3 Plano de experimentação.....	68
4.3 Análise e discussão dos resultados	72
4.3.1 Influência de um fluxo de trabalho aleatório.....	72
4.3.2 Influência de um fluxo de trabalho directo.....	87
4.4 Conclusões sumárias	92
Capítulo 5 gPOLCA: Um Novo Mecanismo de WLC.....	95
5.1 A necessidade de mecanismos de WLC baseados em cartões	96
5.3 Mecanismo gPOLCA	99
5.3.1 Modo de operação	99
5.3.2 Parâmetros	103
5.3.3 Classificação.....	105
5.4 Estudo de simulação	106
5.4.1 Modelo.....	106
5.4.3 Análise e discussão dos resultados	108
5.5 Conclusões sumárias.....	114
Capítulo 6 Conclusões e Trabalho Futuro	117
6.1 Conclusões.....	118

6.1.1 Mecanismos de WLC <i>customizados</i>	118
6.1.2 Influência das normas de carga	119
6.1.3 Influência das estratégias de controlo.....	120
6.1.4 Influência dos parâmetros de lançamento	122
6.1.5 Mecanismo gPOLCA	123
6.2 Trabalho futuro.....	125
Bibliografia.....	127
Anexo A Modelos de Simulação	139
A.1 Código SIMAN de um modelo de simulação usado no estudo do comportamento de mecanismos de WLC.....	139
A.2 Código SIMAN de um modelo de simulação usado na avaliação do gPOLCA ...	150

Lista de Siglas e Acrónimos

Factores e Parâmetros

DF	Factor de depreciação
LL	Limite de carga
LPG	Percentagem de carga
PI	Entradas planeadas
PO	Saídas planeadas
RP	Período de libertação
TL	Limite temporal

Mecanismos de Controlo da Actividade de Produção

BSC	Base Stock Control
CONLOAD	CONstant LOAD
CONWIP	CONstant Work in Progress
DBR	Drum Buffer Rope
gPOLCA	generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization
LOOR	Load Oriented Order Release
LUMS	Lancaster University Management School
MIL	Modified Infinite Loading
MRP	Materials Requirements Planning
MRPII	Manufacturing Resources Planning
POLCA	Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization
SA	Starvation Avoidance
SLAR	Superfluous Load Avoidance Release
TKS	Toyota Kanban System
TOC	Theory of Constraints
WR	Workload Regulation

Outras

ATO	Montagem por encomenda (Assemble-To-Order)
BI	Índice de Balanceamento
CAP	Controlo da Actividade de Produção
ETO	Concepção por encomenda (Engineering-To-Order)
FIFO	Frist-In-Frist-Out
JIT	Just In Time
MTO	Produção por encomenda (Make-To-Order)
MTS	Produção para stock (Make-To-Stock)
PEE	Ponto de Entrada de Encomendas
PPC	Production Planning and Control
QRM	Quick Response Manufacturing
RMS	Root mean square
TP	Taxa de Produção
WIP	Work-In-Process
WLC	WorkLoad Control

Índice de Figuras

Figura 1.1: Relação entre os diferentes termos usados.....	6
Figura 2.1: Modelo do funil (Plossl, 1985).	11
Figura 2.2: Derivação do diagrama de entradas e saídas (Wiendahl, 1995).	13
Figura 2.3: Taxa de saída e tempo médio de percurso <i>vs.</i> WIP (Shimoyashiro <i>et al.</i> , 1984).....	15
Figura 2.4: Níveis de decisão do conceito WLC.....	15
Figura 2.5: Contribuição de um trabalho ao longo do tempo para a carga de um centro de trabalho (Oosterman <i>et al.</i> , 2000).	21
Figura 2.6: Carga agregada e carga agregada alargada.	22
Figura 2.7: Passos principais do mecanismo LOOR (Bechte, 1994).	23
Figura 2.8: Síndrome do <i>lead time</i> (Plossl, 1988).	27
Figura 3.1: Possíveis posições do PEE na cadeia de valor do fluxo de materiais.	48
Figura 3.2: Modelo genérico de agregação da carga.....	49
Figura 3.3: Mecanismo resultante da agregação da carga em dois grupos de capacidade.	52
Figura 4.1: Comportamento das estratégias na configuração <i>job shop</i>	73
Figura 4.2: Controlo da carga lançada por limite superior <i>vs.</i> limite inferior.	77
Figura 4.3: Evolução da carga na <i>pool</i> para as duas estratégias de limitação da carga..	78
Figura 4.4: Comportamento das estratégias sob influência do período de libertação.	79
Figura 4.5: Comportamento das estratégias sob influência do limite temporal.	80
Figura 4.6: Comportamento das estratégias na configuração <i>flow shop</i> geral.	88
Figura 4.7: Comportamento das estratégias na configuração <i>flow shop</i> pura.	89
Figura 4.8: Evolução da carga directa quando é usado o controlo da carga por limite superior.	91
Figura 4.9: Evolução da carga directa quando é usado o controlo da carga por limite inferior.	92
Figura 5.1: Ilustração do mecanismo POLCA.	97
Figura 5.2: Ilustração do mecanismo gPOLCA.	100

Figura 5.3: Comportamento dos mecanismos sob uma mistura homogénea de produtos.	109
Figura 5.4: Comportamento dos mecanismos sob alterações na mistura de produtos.	112
Figura 5.5: Localização do WIP.	114

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Caracterização dimensional dos mecanismos de CAP.....	46
Tabela 3.2: Parametrização do modelo genérico com diferentes mecanismos de WLC.....	51
Tabela 4.1: Condições de operação do sistema produtivo.....	63
Tabela 4.2: Condições de controlo da produção.....	63
Tabela 4.3: Matriz de roteiros de fabrico.....	65
Tabela 4.4: Resultados globais das estratégias de controlo.....	74
Tabela 4.5: Diferenças de desempenho entre as estratégias de controlo.....	75
Tabela 4.6: Factores controláveis.....	81
Tabela 4.7: Factores de ruído.....	81
Tabela 4.8: Matriz Ortogonal $L_{16}(2^{15})$ de Taguchi.....	83
Tabela 4.9: Matriz Ortogonal $L_4(2^3)$ de Taguchi.....	83
Tabela 4.10: Resultados dos testes para o tempo no sistema.....	85
Tabela 4.11: Efeito dos factores controláveis (dB).....	86
Tabela 4.12: ANOVA para a razão S/R.....	86
Tabela 5.1: Resultados globais sob uma mistura homogénea de produtos.....	109
Tabela 5.2: Resultados globais sob alterações na mistura de produtos.....	113

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas décadas as empresas têm enfrentado importantes e crescentes desafios, principalmente em resultado da concorrência imposta pela globalização dos mercados de produtos e factores de produção.

Ainda que a inovação de produtos constitua um importante factor de competitividade, ela é, geralmente, insuficiente para a manutenção da sustentabilidade empresarial. Em prazo curto, a concorrência tende a diluir a capacidade competitiva assente apenas nesta vertente concorrencial, frustrando as expectativas dos resultados esperados. Há que inovar em várias frentes!

A inovação de processos produtivos e de processos de gestão são, também, importantes factores de competitividade. Ao contrário da deslocalização de unidades produtivas para regiões do globo de mão-de-obra barata, a inovação dos processos produtivos e de gestão, tem a vantagem de contribuir para a sustentabilidade empresarial a prazo e para a missão socio-económica das empresas no mundo, onde quer que estas se instalem. Falar em inovação dos processos de gestão significa, em síntese, encontrar novas formas de gestão que assegurem, por um lado, a satisfação dos clientes e, por outro, a utilização eficiente dos factores de produção. Em particular, para que as empresas possam permanecer competitivas no mercado global actual, é necessário que as estratégias produtivas adoptadas foquem a necessidade de responder rapidamente às solicitações do mercado, reduzindo prazos de entrega e garantindo entregas atempadas. Ao mesmo tempo, é necessário assegurar produtos personalizados, i.e. ajustados aos requisitos dos

2 Introdução

clientes, com elevada qualidade e baixos preços. Isto não é tarefa fácil! Entre outras medidas obriga, as empresas, a adoptarem formas eficientes e eficazes de organizar e operar os seus sistemas produtivos. Impõe-se, assim, a procura continuada de novos conceitos, processos e soluções de planear e controlar a produção.

Esta tese procura contribuir para o desenvolvimento de sistemas de Planeamento e Controlo da Produção (PPC) mais eficazes, estudando formas de controlar o progresso e a execução das ordens de produção através do sistema produtivo, desde a aquisição das matérias-primas até à entrega do produto acabado ao cliente. Neste contexto, o lançamento de trabalhos para o espaço fabril é analisado com particular ênfase. O foco da tese é ao nível do Controlo da Actividade de Produção (CAP).

1.1 Contexto de investigação

Genericamente, o termo *job shop* é utilizado para designar um sistema produtivo, onde é produzida uma elevada variedade de produtos, usualmente em pequenas quantidades. Este tipo de sistema é frequentemente configurado num *layout* funcional, no qual máquinas ou postos de trabalho similares são agrupados em secções ou centros de trabalho, possibilitando roteiros de fabrico bastante diversificados. É frequente encontrar este tipo de sistema produtivo em Pequenas e Médias Empresas - PME's a operar no sector da produção por encomenda (Henrich *et al.*, 2002). O sector de produção por encomenda, como definido por autores como Kingsman *et al.* (1996) e Stevenson *et al.* (2005a), refere-se a empresas que concebem e/ou produzem produtos apenas em resposta às encomendas dos clientes.

Do ponto de vista do controlo da actividade de produção, o *job shop* é geralmente considerado um ambiente produtivo difícil. As principais razões prendem-se com a complexidade da estrutura produtiva, com a elevada variabilidade dos processos produtivos, nomeadamente ao nível dos roteiros de fabrico e tempos de processamento e como a incerteza relativamente à chegada de encomendas. Por ser frequente na prática industrial, o controlo da actividade de produção em *job shop* é bastante importante. Tradicionalmente os problemas de investigação neste âmbito enquadram-se em duas perspectivas: a estática e a dinâmica.

A perspectiva estática, ou determinística, assume um ambiente produtivo estático em que existe um conjunto de trabalhos disponíveis, criando um programa de produção detalhado, que procura otimizar um determinado critério de desempenho, tipicamente o *makespan*, i.e. o tempo máximo para a conclusão dos trabalhos disponibilizados conjuntamente. Basicamente, o programa especifica a sequência e os tempos de início e de fim de processamento, de cada trabalho, nos diversos recursos ou meios de produção. O problema resultante é tido na teoria da complexidade como *NP-hard* (Pinedo e Chao, 2005). Isto significa que encontrar uma solução óptima se torna praticamente impossível para problemas de dimensões realistas.

A perspectiva dinâmica, ou estocástica, assume um ambiente produtivo dinâmico e incerto, onde novos trabalhos chegam continuamente ao sistema. Neste ambiente mais realista, programar os momentos exactos de início e de fim de processamento de cada trabalho nos diversos recursos, na mira de otimizar um dado critério de desempenho, é pouco realista. O programa de produção obtido rapidamente fica desactualizado pela chegada de novos trabalhos e em resultado de perturbações no sistema produtivo decorrentes de avarias de máquinas e equipamento, de desvios nos tempos de preparação, de processamento e de transporte ou movimentação, do absentismo dos operadores, etc.. Frequentemente, a re-programação da produção é usada para lidar com este problema. Contudo, isto implica, por um lado, obter e processar mais informação e por outro, uma alteração contínua dos planos de produção. Esta última, pode resultar em menor visibilidade, para operadores e gestores e em menor eficiência, como tem sido argumentado por diversos autores. Surge então a questão: como programar a produção em ambientes produtivos dinâmicos?

Uma estratégia possível consiste simplesmente na criação de *buffers*, i.e. zonas de armazenamento temporário de trabalho em curso de fabrico (*Work In Process - WIP*), de forma a reduzir o impacto negativo das perturbações acima referidas, garantindo uma utilização adequada dos recursos. Neste contexto, grande parte da investigação em problemas dinâmicos, tem-se centrado no estudo do comportamento de regas de prioridade. Estas especificam para cada recurso, a sequência pela qual os trabalhos devem ser processados, sem ter em conta a problemática do seu lançamento para o espaço fabril. Esta prática assume que é inevitável que os trabalhos aguardem pela disponibilidade dos recursos em filas de espera no espaço fabril. Devido à sua

4 Introdução

simplicidade e aceitação generalizada na indústria, centenas de regras de prioridade têm sido desenvolvidas, ver por exemplo Blackstone *et al.* (1982) e Ramasesh (1990). Esta prática pode, contudo, conduzir ao aumento dos tempos de espera nas filas e consequentemente ao aumento dos tempos de percurso dos trabalhos no espaço fabril (*flow times*), i.e. desde que são lançados até que são concluídos. A questão que agora se coloca é: quanto WIP é realmente necessário e como deve ser distribuído pelo sistema produtivo de forma a atingir os objectivos de produção?

O Workload Control (WLC) é um conceito de Planeamento e Controlo da Produção originariamente concebido para *job shops* no sector de produção por encomenda (Haskose *et al.*, 2002). Tem como principal objectivo controlar as filas de espera do espaço fabril, com vista a respeitar as datas de entrega prometidas com base nos recursos disponíveis. Se as filas de espera permanecerem relativamente pequenas e controladas, então os tempos de espera e consequentemente os tempos de percurso manter-se-ão, também, controlados. Assunções acerca do tempo requerido para produzir cada encomenda ou trabalho, obtidas com base nos tempos de percurso, podem ser posteriormente usadas para estabelecer datas de entrega. Este tempo planeado de produção é vulgarmente referido como *lead time* de produção. Uma vez que incumprimentos das datas de entrega acordadas frequentemente afectam o recebimento de novas encomendas, assegurar *lead times* curtos e fiáveis constitui um importante factor de competitividade.

A natureza diversa e imprevisível do sector de produção por encomenda, associada à complexidade da produção em *job shop*, tornam desapropriado neste ambiente, adoptar muitas das estratégias de planeamento e controlo da produção associadas à chamada filosofia *Just In Time* (JIT), como também é argumentado por autores como Zapfel e Missbauer (1993) e Kingsman e Hendry (2002), entre outros. Em geral, neste ambiente, as empresas competem por cada encomenda que recebem, frequentemente diferente da anterior, negociando um preço, uma data de entrega ou ambos (Kingsman e Hendry, 2002). Isto significa que não existe nem uma procura estável, nem um limitado grau de personalização ou *customização* dos produtos; requisitos essenciais no JIT (Suri, 1998).

Ao longo dos últimos trinta anos o WLC tem recebido bastante atenção de investigadores e gestores industriais, devido à sua simplicidade e similaridade com o que é feito na prática industrial. Três conceitos principais foram desenvolvidos, no

início dos anos oitenta, por Bechte em Hannover (Bechte, 1980, 1988, 1994 e Wiendahl, 1995), por Bertrand e Wortmann (1981) em Eindhoven e por Tatsiopoulos em Lancaster (Tatsiopoulos, 1983, Kingsman *et al.* 1989, Hendry e Kingsman, 1991 e Stevenson e Hendry, 2006). Estes sugerem uma abordagem hierárquica ao controlo das filas de espera do espaço fabril. Esta abordagem é baseada em três níveis de decisão: entrada de trabalhos no sistema, lançamento dos trabalhos para o espaço fabril e despacho dos trabalhos em fila de espera. Em cada nível é possível distinguir entre duas formas de controlo: *input control* - controlo das entradas e *output control* - controlo das saídas. O primeiro regula a carga no sistema, aceitando a entrada de trabalhos no sistema, lançando os trabalhos para o espaço fabril e seleccionando trabalhos das filas de espera para serem processados nos recursos. O segundo regula a capacidade do sistema produtivo por intermédio de ajustes a médio, curto e imediato prazo.

Segundo Kingsman (2000) o despacho constitui uma forma de controlo relativamente fraca, apenas eficaz em conjunto com o lançamento controlado de trabalhos para o espaço fabril. Um instrumento mais forte de controlo é, portanto, o lançamento, o qual envolve o uso de uma denominada *pool* ou carteira de ordens de produção. As ordens de produção nem sempre são imediatamente lançadas, i.e. enviadas ou libertadas para o espaço fabril logo que chegam ao sistema, mesmo na situação em que os materiais, ferramentas e equipamentos necessários se encontram disponíveis. Ao invés, aguardam na *pool* por autorizações de lançamento. Este procedimento tem implicações directas em diversas medidas de desempenho, tal como nos tempos de percurso, os quais influenciam as datas de entrega. Segundo Kingsman (2000), o lançamento pode por si só constituir uma forma eficaz de controlo, se a *pool* também for controlada. Se não o for, os trabalhos poderão aí permanecer demasiado tempo, falhando as datas de entrega prometidas.

O WLC proporciona uma abordagem específica ao lançamento controlado, estabelecendo normas que limitam o WIP no sistema ou em determinados pontos deste, designados de grupos de capacidade (máquinas, centros de trabalho, células, etc.). Isto é feito através de um mecanismo de CAP, o qual determina o momento e os trabalhos a lançar para o espaço fabril. Os mecanismos de CAP para WLC encontram-se alicerçados na Lei de Little (Little, 1961) e no conceito de controlo de entradas e saídas (*input - output control*) introduzido por Oliver Wight (Wight, 1970). Little descreve, do

6 Introdução

ponto de vista teórico, a relação entre WIP, tempo de percurso e taxa de saída ou de produção. Wight introduziu o conceito de controlo de entradas e saídas, advogando a regulação do fluxo de entrada de trabalho em função do fluxo de saída, como forma de controlar o WIP e consequentemente os tempos de percurso. A ideia básica é lançar novos trabalhos, ou ordens de produção, à medida que os trabalhos previamente lançados são concluídos, mantendo desta forma o WIP no espaço fabril a níveis adequados e planeados.

No final dos anos oitenta foi iniciada a discussão acerca do valor do lançamento controlado por autores como Kanet (1988) e Melnyk e Ragatz (1989). O paradoxo do WLC continua a frustrar os investigadores desta área. Este paradoxo advém do facto de estudos realizados na prática industrial terem mostrado a importância do lançamento controlado como forma de reduzir os tempos de percurso e os tempos no sistema, enquanto os estudos teóricos, predominantemente de simulação, têm mostrado que o uso da *pool* embora reduzindo os tempos de percurso, nem sempre reduz os tempos no sistema. Por tempo no sistema entende-se o tempo de espera na *pool* mais o tempo de percurso no espaço fabril, ver Figura 1.1.

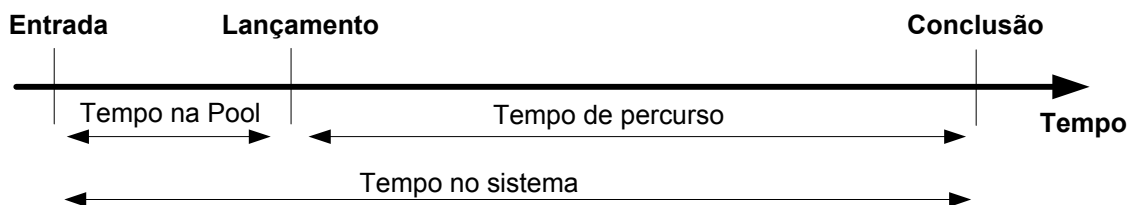


Figura 1.1: Relação entre os diferentes termos usados.

Bertrand e Ooijen (2002) referem que a investigação empírica tem relatado reduções de 40% a 50% dos tempos no sistema, enquanto que a investigação teórica ou não relatou reduções ou relatou reduções pouco significativas. Algumas implementações bem sucedidas são descritas por Tatsiopoulos (1983), Bechte (1988, 1994), Wiendahl (1995) e Park *et al.* (1999).

Alguns autores tentaram resolver o paradoxo do WLC introduzindo factores externos aos mecanismos de CAP nos modelos de simulação. Por exemplo, Melnyk *et al.* (1991, 1992), Zapfel e Missbauer (1993) e Hendry e Wong (1994) procuraram perceber a

influência do alisamento da carga que é libertada para a *pool* pelo sistema de planeamento, pela sua manutenção entre um mínimo e um máximo predefinidos. Philipoom e Fry (1992) estudaram a integração de uma fase de aceitação/rejeição de encomendas e Kingsman e Hendry (2002) investigaram o controlo das saídas (*output control*) em simultâneo com o controlo das entradas (*input control*). Sabuncuoglu e Karapinar (1999) sugeriram a modelação adequada do congestionamento no espaço fabril.

Segundo Breithaupt *et al.* (2002) os estudos de simulação, em geral, têm-se centrado em mecanismos de CAP relativamente simples. Os autores consideram que os modelos de simulação falham na captura de certos aspectos do comportamento humano, nomeadamente, na forma como as pessoas lidam com uma situação de maior transparência no espaço fabril proporcionada pelo lançamento controlado.

A investigação realizada nesta tese é justificada pelo conhecimento limitado que se possui acerca do comportamento dos mecanismos de CAP baseados em WLC, não só em *job shops*, mas também noutros sistemas produtivos, nomeadamente em *flow shops*, i.e. um sistema produtivo configurado segundo um *layout* simplificado ou em linha, no qual todos os trabalhos seguem essencialmente o mesmo roteiro de fabrico ao longo das várias máquinas.

1.2 Objectivos e questões de investigação

Na secção anterior foram identificados três conceitos principais de WLC, propostos por: (1) Bechte (1980); (2) Bertrand e Wortmann (1981) e (3) Tatsiopoulos (1983). Para cada um a literatura tem apontado vantagens e limitações, em termos da forma como procedem ao lançamento de trabalhos para o espaço fabril, ver por exemplo Land e Gaalman (1996, 1998) e Breithaupt *et al.* (2002). Contudo, muitos outros mecanismos de CAP têm sido desenvolvidos e propostos na literatura. Graves *et al.* (1995), Bergamaschi *et al.* (1997) e Fowler *et al.* (2002) revêem a literatura nesta área.

Segundo Oosterman *et al.* (2000), a selecção do mecanismo de CAP adequado a uma particular situação produtiva tem recebido pouca atenção. Em geral, este problema tem sido tratado na literatura comparando o comportamento dos mecanismos, geralmente,

8 Introdução

via simulação. Uma limitação óbvia desta abordagem resulta do conjunto limitado de mecanismos que pode ser considerado de cada vez para comparação.

Uma abordagem mais prática, ainda pouco tratada na literatura, consiste em estudar as principais dimensões dos mecanismos de CAP. Estas descrevem as características e propriedades fundamentais destes mecanismos. Esta abordagem baseia-se na hipótese de que a selecção do mecanismo de CAP, adequado a uma particular situação produtiva, pode ser efectuada pela selecção das estratégias de controlo a adoptar em cada uma destas dimensões.

Considerando o exposto, nesta tese serão perseguidos os objectivos seguintes:

1. Aprofundar o conhecimento acerca do funcionamento dos mecanismos de CAP baseados em WLC.
2. Estabelecer orientações práticas para a selecção de mecanismos adequados a situações concretas e particulares de produção.

O primeiro objectivo pode ser visto como um pré requisito para o segundo, do qual deriva a importância teórica desta tese.

As questões centrais que guiarão esta investigação são as seguintes:

1. Como desenvolver mecanismos de CAP baseados em WLC, *customizados* e adequados a situações produtivas específicas?
2. Como é que as estratégias de controlo e os parâmetros de lançamento, que vulgarmente são necessários especificar nos mecanismos de CAP baseados em WLC, afectam o desempenho destes?
3. Como pode o desempenho dos mecanismos de CAP baseados em WLC ser melhorado?

1.3 Organização da tese

A tese encontra-se organizada em seis capítulos. Estes, embora relacionados, foram escritos de forma a permitir a sua leitura isolada. O próximo capítulo proporciona uma visão detalhada do WLC e das suas mais recentes extensões e ajustes. Este capítulo é

relevante para o leitor pouco familiarizado com o WLC, podendo, contudo, ser dispensado por especialistas na área.

O capítulo 3 procura questionar e compreender as diferenças entre os mecanismos de CAP. Em particular, são discutidas as principais dimensões dos mecanismos e para cada dimensão, as diferentes estratégias de controlo que é possível adoptar. Procura-se, ainda, desenvolver um modelo genérico de agregação da carga, capaz de configurar diversos mecanismos de CAP baseados em WLC.

O capítulo 4 procura estabelecer orientações práticas para a selecção do mecanismo de CAP baseado em WLC, adequado a uma determinada situação produtiva. Isto é feito estudando, via simulação, a influência de diferentes estratégias de controlo e parâmetros de lançamento, no desempenho dos mecanismos. Analisa-se, também, a influência de diferentes configurações produtivas e a robustez das estratégias de controlo e dos parâmetros considerados a perturbações no sistema produtivo.

O capítulo 5 introduz um novo mecanismo de CAP baseado em WLC, eficiente e relativamente simples de ser implementado na prática industrial. O mecanismo foi concebido com base num conjunto de orientações resultantes do capítulo 4. O capítulo inclui, ainda, um estudo de simulação que compara o mecanismo proposto com outros que têm sido frequentemente referidos na literatura.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e contribuições da tese. É ainda elaborado um conjunto de propostas para trabalho futuro.

Capítulo 2

O Conceito Workload Control

O conceito Workload Control (WLC) é baseado no princípio do controlo de entradas e saídas (*input - output control*) definido por Wight (1970) e Plossl e Wight (1973), podendo ser visto como um extensão natural deste.

A importância do controlo de entradas e saídas como forma de controlar o WIP e consequentemente o tempo de percurso, foi enfatizada por Plossl (1985) através do modelo do funil (Figura 2.1). O modelo mostra que a taxa de entrada deve ser definida e controlada em função da taxa de saída. Esta última é influenciada pela capacidade, a qual é ajustável, dentro de certos limites. O nível de WIP é determinado pela diferença entre as taxas de saída e entrada, influenciando, por sua vez, os tempos de percurso e consequentemente o *lead time* de produção dos trabalhos.

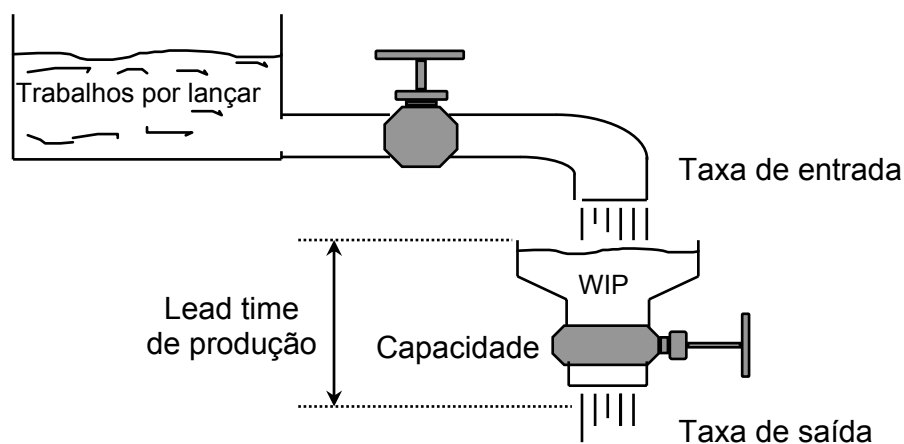


Figura 2.1: Modelo do funil (Plossl, 1985).

O principal objectivo do WLC pode ser definido como controlo das filas de espera do espaço fabril, com o intuito de criar tempos de percurso estáveis e reduzidos e consequentemente proporcionar datas de entrega realísticas. A ideia básica é a de balancear e limitar o WIP a um nível tão baixo quanto possível, de forma a assegurar uma utilização adequada dos recursos, evitando tempos mortos e simultaneamente reduzindo os tempos de percurso.

Este capítulo proporciona uma visão detalhada do conceito WLC, particularmente da fase lançamento de trabalhos para o espaço fabril. O capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: a secção 2.1 discute a relação entre a carga e o tempo de percurso; a secção 2.2 descreve como o WLC usa o princípio do controlo de entradas e saídas a diferentes níveis hierárquicos de decisão, nomeadamente, na entrada, lançamento e despacho; a secção 2.3 discute diferentes abordagens para o controlo da carga lançada, dando particular ênfase à abordagem implementada no mecanismo LOOR. Por último, a secção 2.4 identifica características distintivas do WLC.

2.1 Relação entre carga e tempo de percurso num centro de trabalho

O conceito WLC encontra-se alicerçado na relação entre carga e tempo de percurso. Pela imposição de normas ou limites de carga, o WLC procura controlar os tempos de percurso. Esta relação é ilustrada na Figura 2.2 usando o modelo do funil e o diagrama de entradas e saídas (Wiendahl, 1995).

O modelo do funil (lado esquerdo da figura) faz uma analogia entre o processamento de trabalhos num centro de trabalho e o fluxo de um líquido num funil. Para uma dada secção do funil, o tempo de fluxo é proporcional à quantidade de líquido. Por analogia, para uma determinada capacidade do centro de trabalho, os tempos de percurso dos trabalhos apenas podem ser reduzidos por redução do WIP. Este último é representado na figura pelo enchimento do funil.

A capacidade do centro de trabalho refere-se à taxa máxima de produção, ou de saída, medida em unidades produzidas por unidade de tempo. Se a carga que chega ao centro de trabalho, dada pelos trabalhos em fila de espera, for medida nas mesmas unidades da

carga processada ou transformada, então o tempo necessário para processar todos os trabalhos que se encontram em fila de espera será (Kingsman, 2000):

$$\text{Lead Time} = \frac{\text{Carga (medida em trabalho a transformar)}}{\text{Capacidade (medida em trabalho transformado por período)}} \quad (2.1)$$

Embora esta noção de *lead time* seja intuitiva ela está associada à lei de Little (Little, 1961), a qual relaciona do ponto de vista teórico, o WIP, o tempo de percurso e taxa de saída. Esta lei estabelece que no longo prazo, o tempo médio que um trabalho passa num sistema, é igual ao número médio de trabalhos que aí se encontram dividido pela taxa média de chegada, a qual em regime estacionário deve igualar a taxa média de saída do sistema. Neste contexto a definição de sistema é flexível, podendo referir-se ao espaço fabril, a um departamento ou a um centro de trabalho individual. Kobayashi (1978) mostrou que a lei de Little é válida não só para a disciplina *frist-in-frist-out* (FIFO) mas para qualquer outra disciplina.

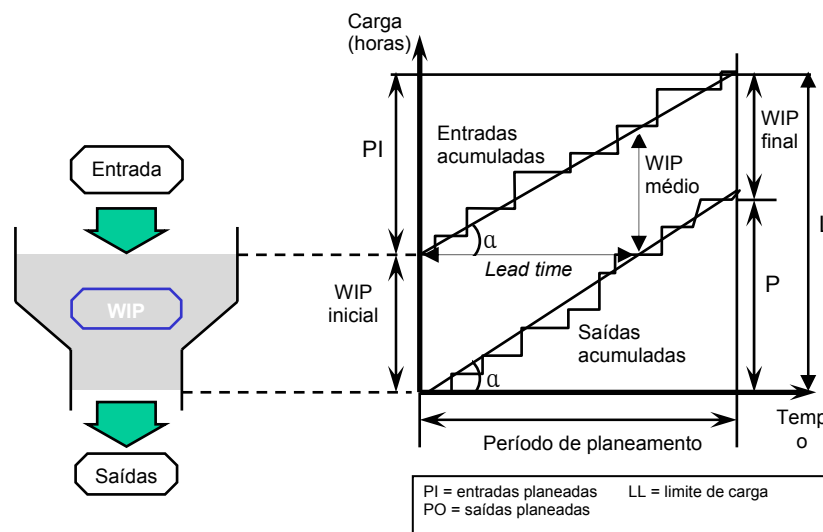


Figura 2.2: Derivação do diagrama de entradas e saídas (Wiendahl, 1995).

Enquanto o modelo do funil apenas oferece informação momentânea, o diagrama de entradas e saídas (lado direito da figura) resulta da observação do centro de trabalho ao longo de um determinado período de tempo, designado de período de planeamento.

O diagrama é formado por duas curvas, entradas acumuladas e saídas acumuladas, representando, respectivamente, a chegada e a saída de trabalhos ao longo do tempo quando a disciplina FIFO é usada. No eixo das abcissas encontra-se o tempo,

geralmente indicado em dias de trabalho e no eixo das ordenadas encontra-se a carga, geralmente indicada em horas.

A diferença vertical entre as curvas de entradas acumuladas e saídas acumuladas indica a dimensão momentânea da fila de espera, i.e. o WIP. A diferença horizontal entre estas representa o tempo de percurso do trabalho no centro de trabalho. Note-se que de acordo com a disciplina FIFO, um trabalho que chega à fila de espera de um centro de trabalho, tem de esperar pelo processamento de todos os trabalhos que chegaram antes para que possa começar a ser processado. Assim, os incrementos observados nas duas curvas, a um determinado nível horizontal, estão relacionados com o mesmo trabalho. Esta relação gráfica deixa, contudo, de se manter no caso das sequências de entrada e saída diferirem.

Em regime estacionário as curvas de entradas acumuladas e saídas acumuladas podem ser aproximadas por duas linhas paralelas, em que a inclinação representa a razão entre o WIP médio e o *lead time* (LT) no centro de trabalho, i.e. a taxa de saída, ver figura 2.2. Fica, assim, a relação indicada pela lei de Little evidente:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\text{Saídas planeadas (PO)}}{\text{Período de planeamento}} = \frac{\text{WIP médio}}{\text{LT}} \quad (2.2)$$

Se WIP no centro de trabalho variar amplamente, e conseqüentemente a distância vertical entre as duas curvas, uma variação correspondente do tempo médio de percurso resultará. Shimoyashiro *et al.* (1984) ilustram esta variação (Figura 2.3) em função do WIP. Acima de um determinado nível de WIP, designado de valor crítico, não há um incremento significativo na taxa de saída, uma vez que o WIP existente assegura a alimentação permanente dos recursos produtivos. Abaixo deste valor, a paragem dos recursos por falta de material tende a ocorrer com frequência crescente.

Quando o WIP é incrementado acima do valor crítico, o tempo médio de percurso aumenta na razão directa do WIP, uma vez que a taxa de saída se mantém constante, obedecendo à lei de Little. Abaixo do valor crítico, o tempo médio de percurso diminui com o WIP, podendo atingir um valor mínimo (teórico), dado pelo tempo das operações realizadas no centro de trabalho mais o tempo de manuseamento ou movimentação.

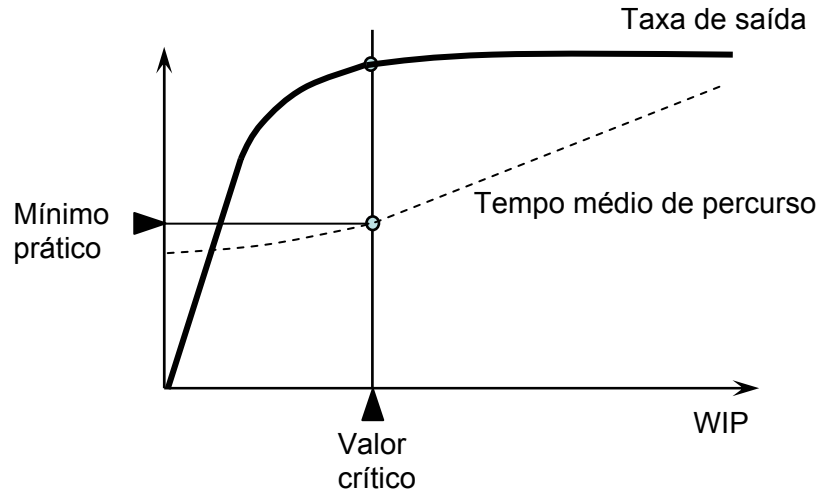


Figura 2.3: Taxa de saída e tempo médio de percurso vs. WIP (Shimoyashiro *et al.*, 1984).

Conclui-se, assim, que o WIP deve ser controlado para que, por um lado, o tempo morto resultante da paragem dos recursos seja evitado, e por outro, um tempo de percurso reduzido seja alcançado.

2.2 Controlo das entradas e saídas a diferentes níveis hierárquicos

O princípio básico do WLC tem sido definido por autores como Kingsman *et al.* (2000) e Kingsman e Hendry (2002), entre outros, como o controlo das filas de espera no espaço fabril. É possível identificar três níveis hierárquicos de decisão nos quais o controlo das filas de espera pode ser realizado, nomeadamente: a entrada, o lançamento e o despacho, ver Figura 2.4.

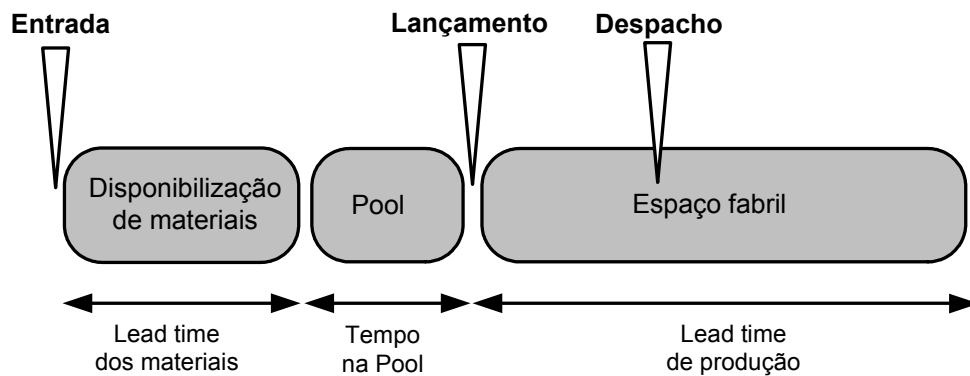


Figura 2.4: Níveis de decisão do conceito WLC.

Em cada nível é, ainda, possível distinguir entre as duas formas de controlo: controlo das entradas e controlo das saídas. O primeiro regula a carga no sistema produtivo, influenciando a entrada de trabalhos para um subsistema específico deste. O segundo proporciona a possibilidade de influenciar a saída de trabalhos, através de ajustes de capacidade a médio, curto e imediato prazo.

2.2.1 Entrada

No WLC, a entrada proporciona a primeira oportunidade para influenciar a quantidade de trabalho no sistema. A aceitação controlada e a determinação de datas de entrega podem contribuir para alisar as necessidades de capacidade ao longo do tempo, facilitando controlo realizado ao nível do lançamento.

A aceitação ou rejeição de encomendas que o cliente pretende colocar é, normalmente, baseada na disponibilidade de capacidade para concluir os trabalhos (ou encomendas) no prazo de entrega estabelecido. Lida, ainda, com situações em que o cliente leva demasiado tempo para considerar e aceitar a proposta da empresa. A aceitação/ rejeição é vulgarmente precedida de um processo de negociação com o cliente, relativamente às especificações do produto, preço e data de entrega. Durante este processo, outras encomendas podem, entretanto, ter sido aceites, reduzindo a capacidade disponível. Segundo autores como Kingsman (2000) e Kingsman e Hendry (2002), entre outros, a decisão de aceitação/ rejeição possui uma importante influência no desempenho do sistema. Por um lado, rejeitar demasiadas encomendas, pode conduzir a uma redução na utilização dos recursos e conseqüentemente na taxa de produção ou de saída do sistema, podendo ter repercussões nas relações futuras com os clientes; por outro, aceitar demasiadas encomendas, pode conduzir ao congestionamento do espaço fabril, incrementando os tempos de percurso e, eventualmente, colocando em risco o cumprimento das datas de entrega estabelecidas.

2.2.2 Lançamento

O lançamento é a função do controlo da actividade de produção encarregue de libertar ou lançar trabalhos para o espaço fabril. O lançamento tem sido indicado por diversos autores como o principal instrumento de controlo dentro do WLC. Após a aceitação de um trabalho ou encomenda é, em geral, necessário realizar um conjunto de operações de

preparação (aquisição/ engenharia/ planeamento de processo), antes que este fique disponível para lançamento. A disponibilização do trabalho para lançamento não implica, contudo, o seu lançamento imediato para o espaço fabril. Em geral, os trabalhos aguardam numa denominada *pool* até serem seleccionados, ver Figura 2.4. Enquanto aí permanecem alterações inesperadas à quantidade e às especificações dos produtos podem ser acomodadas com relativa facilidade. A Figura 2.3 parece sugerir que o uso da *pool* não resultará num aumento do tempo médio de percurso. O tempo que os trabalhos aí passam, seria, de outra forma, passado em filas de espera no espaço fabril.

Dentro do WLC a decisão de lançamento é tomada periodicamente, sendo, em geral, baseada em dois critérios, nomeadamente, na urgência do trabalho e na influência deste na situação actual do espaço fabril, i.e. na distribuição da carga pelos centros de trabalho. Este último critério é determinado comparando as cargas existentes e/ou resultantes do lançamento do trabalho, com normas de carga, em cada centro de trabalho.

As normas de carga estabelecem limites para a carga admissível nos centros de trabalho e são, usualmente, expressas em unidades de tempo, v.g. horas de trabalho. As cargas são geralmente calculadas como uma agregação de tempos de processamento individuais, reflectindo o nível de WIP nos diferentes centros de trabalho. Para cada centro de trabalho, a carga pode ser subdividida numa parte directa e numa parte indirecta ou a montante. A primeira resulta dos trabalhos que se encontram em fila de espera e em processamento no centro de trabalho. A segunda resulta de trabalhos lançados que ainda não chegaram ao centro de trabalho, i.e. que se encontram em trânsito.

O lançamento determina o número de trabalhos no espaço fabril e conseqüentemente o nível de carga total. Afecta, também, a mistura de produtos no espaço fabril, determinando o balanceamento da carga entre centros de trabalho. O lançamento de trabalhos ignorando a carga que se encontra nos centros de trabalho, pode resultar em estrangulamentos no espaço fabril. Limitar e balancear a carga, através de normas, deverá, assim, contribuir para criar tempos de percurso estáveis e reduzidos, evitando o uso de regras de prioridade sofisticadas ao nível do despacho.

2.2.3 Despacho

O despacho é a função do controlo da actividade de produção encarregue de seleccionar, dos trabalhos que se encontram em fila de espera, aquele a afectar a uma máquina ou unidade de produção, que fica livre. O papel do despacho no WLC é bastante modesto, uma vez que a escolha entre trabalhos está limitada pelas dimensões reduzidas das filas de espera do espaço fabril. Contudo, como cada trabalho possui um roteiro de fabrico próprio, a decisão de despacho influencia a disponibilidade de trabalhos noutros centros de trabalho. Melnyk e Ragatz (1989) consideram que a chave para um controlo eficaz do espaço fabril, não reside em controlar os trabalhos após o seu lançamento, mas em controlar o seu lançamento. De acordo com autores como Bechte (1994) e Kingsman (2000), entre outros, o uso de regras de prioridade simples é suficiente ao nível do despacho. Em geral, são usadas regras como a FIFO, a qual garante a menor variação entre os tempos de percurso dos trabalhos (Bechte, 1994), ou então regras orientadas à data de entrega, as quais permitem corrigir perturbações no progresso individual entre trabalhos.

2.3 Conceitos clássicos de WLC

O WLC reconhece a inevitabilidade do uso de filas de espera para lidar com a variabilidade do processo produtivo e a incerteza da procura, particularmente em *job shop*. Procura, assim, criar filas pequenas e estáveis, i.e. níveis de carga directa pequenos e estáveis. A carga directa de um centro de trabalho é definida como a quantidade de trabalho, v.g. horas, resultante dos trabalhos que se encontram em fila de espera e em processamento no centro de trabalho.

O WLC proporciona uma abordagem específica ao lançamento de trabalhos para o espaço fabril, balanceando e limitando a carga nos centros de trabalho. Isto é feito através de um mecanismo de controlo da actividade de produção, que determina qual o momento e quais os trabalhos a lançar. A complexidade deste tipo de controlo das entradas resulta, essencialmente, da variabilidade dos roteiros de fabrico dos trabalhos. Em particular, não é possível controlar completamente a carga directa de um centro de trabalho através do lançamento. Apenas uma parte dos trabalhos processados, no centro de trabalho, é lançada directamente da *pool* para estes. Os restantes, são provenientes de

centros de trabalho a montante, no roteiro de fabrico do trabalho, i.e. encontram-se em trânsito para o centro de trabalho.

Três abordagens diferentes têm sido sugeridas para controlar a carga directa dos centros de trabalho.

A abordagem desenvolvida por Bechte (Bechte, 1980, Bechte, 1994 e Wiendahl, 1995) usa um método designado de conversão da carga. Como não é possível conhecer com precisão, qual a fracção da carga a montante que irá chegar durante o período de planeamento, i.e. período de libertação, a cada um dos centros de trabalho, esta é estimada usando o método de conversão. O período de libertação refere-se ao intervalo de tempo entre lançamentos. No momento do lançamento, o método actualiza a carga directa em cada centro de trabalho s , resultante dos trabalhos que se encontram em fila de espera e em processamento em s e estima a contribuição dos trabalhos a montante para esta carga. A carga resultante, sendo a soma da carga directa com a carga estimada é, geralmente, designada de carga convertida L_s^C . Em cada centro de trabalho são usadas normas para a carga convertida, as quais restringem a carga que pode ser lançada para estes. A contribuição de cada um dos trabalhos a lançar, ou em trânsito, para a carga directa de um centro de trabalho s , em termos de tempo de processamento, depende da probabilidade deste chegar a s durante o período de libertação. Aquela probabilidade é, naturalmente, função da posição de s no roteiro de fabrico do trabalho. Isto significa que quanto mais afastado o trabalho se encontrar de s , menos provável é, que este chegue ao centro de trabalho no período de planeamento ou de libertação considerado e, conseqüentemente, menos carga é contabilizada para a carga convertida de s . Esta abordagem é explicada em detalhe na secção 2.3.1.

Uma outra forma de controlar a carga, no momento do lançamento, consiste em agregar a carga a montante e directa de cada um dos centros de trabalho. Esta abordagem, desenvolvida por Bertrand e Wortmann (1981) e Tatsiopoulos (1983), e mais tarde estendida por Hendry e Kingsman (Hendry, 1989, Hendry e Kingsman, 1991), evita estimar a contribuição dos trabalhos a montante para a carga directa dos centros de trabalho. Neste caso, em cada centro de trabalho são usadas normas para a carga agregada, i.e. para a soma da carga directa com a carga a montante. Assim, quando um trabalho i é lançado para o espaço fabril, o seu tempo de processamento $p_{i,s}$ num dado centro de trabalho s , é integralmente contabilizado na carga agregada deste,

independentemente da sua posição no roteiro de fabrico. Admitindo que I é o conjunto de trabalhos que tem s no seu roteiro de fabrico, a carga agregada de s , L_s^A , é especificada pela seguinte equação:

$$L_s^A = \sum_{i \in I} p_{is} \quad (2.3)$$

L_s^A resulta, portanto, da soma dos tempos de processamento dos trabalhos que se encontram em s e dos que se encontram a montante ou em trânsito para s . Assim, um trabalho que, por exemplo, tenha um tempo de processamento de 1 hora em s , contribui com 1 hora para a carga agregada deste, desde que é lançado até que é concluído em s .

Mais recentemente, Oosterman *et al.* (2000) introduziram uma abordagem que combina elementos das duas anteriores, usando normas para a carga ajustada. A ideia subjacente é que a carga agregada de um centro de trabalho s seja corrigida da posição (variável) deste, no roteiro de fabrico dos trabalhos. A carga resultante é designada de carga ajustada e pode ser vista como uma estimativa da carga directa futura do centro de trabalho. Neste caso, apenas uma fracção do tempo de processamento do trabalho em s é contabilizada na carga ajustada. Esta fracção é dada pela razão entre o *lead time* em s , LT_s , e o *lead time* até s . Este último resulta, para cada trabalho, da soma do *lead time* em s com o *lead time* em cada um dos centros de trabalho que se encontram a montante de s , LT_{i,U_s} . A carga ajustada de s , L_s^E , resultante do conjunto de trabalhos I é dada por:

$$L_s^E = \sum_{i \in I} \frac{LT_s}{LT_s + LT_{i,U_s}} p_{i,s} \quad (2.4)$$

Se, se admitir *lead times* iguais em todos os centros de trabalho, então a carga ajustada pode, simplesmente, ser dada por:

$$L_s^E = \sum_{i \in I} \frac{1}{o_{i,s}} p_{i,s} \quad (2.5)$$

Em que $o_{i,s}$ é definido como a posição ordenada de s no roteiro de fabrico do trabalho i . Assim, um trabalho i que, por exemplo, tenha um tempo de processamento de 1 hora, num centro de trabalho s que realize a quarta operação do seu roteiro de fabrico ($o_{i,s} = 4$), contribui com 0,25 horas para a carga ajustada deste, desde que é lançado até que é concluído. Isto não é mais do que depreciar a carga agregada de um factor de $1/o_{i,s}$.

Em qualquer das abordagens, um trabalho começa a contribuir para a carga de um centro de trabalho, a partir do momento em que é lançado para o espaço fabril. No caso da carga agregada, a contribuição do trabalho, em termos de tempo de processamento, é total. No caso da carga convertida, a contribuição é depreciada até que o trabalho se torne parte da carga directa do centro de trabalho. Nesta situação, a contribuição passa também a ser total. Isto significa que o factor de depreciação se altera no intervalo de tempo entre o lançamento e a sua conclusão no centro de trabalho. Por último, no caso da carga ajustada, embora a contribuição do trabalho, em termos de tempo de processamento, seja parcial, a fracção considerada não se altera no intervalo de tempo entre o lançamento do trabalho e a sua conclusão no centro de trabalho.

A Figura 2.5 compara a contribuição ao longo do tempo de i , respectivamente, para a carga convertida, agregada e ajustada de s . Na figura considera-se que i , com um tempo de processamento em s de $p_{i,s}$, é lançado para o espaço fabril em t^r , entra na fila de espera de s em t^q e é concluído em s em t^c .

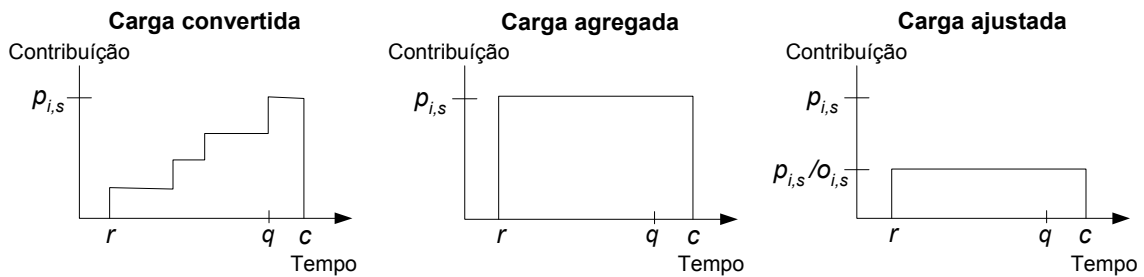


Figura 2.5: Contribuição de um trabalho ao longo do tempo para a carga de um centro de trabalho (Oosterman *et al.*, 2000).

Independentemente de se tratar da carga convertida, agregada ou ajustada, após a conclusão de uma operação, a carga do centro de trabalho onde esta foi realizada, é decrementada em conformidade. Isto significa que é necessário recolher informação de cada vez que se conclui uma operação. Uma alternativa simplificativa deste processo é a abordagem de Tatsiopoulos à carga agregada, onde a necessidade de recolha de informação é restringida aos trabalhos acabados e não às operações concluídas.

De facto, existem diferenças entre as definições de carga agregada de Tatsiopoulos (1983) e de Bertrand e Wortmann (1981). A figura 2.6 ilustra as diferenças. Enquanto Bertrand e Wortmann consideram que a carga agregada de um centro de trabalho resulta

da soma da carga directa com a carga a montante deste, Tatsiopoulos considera que a carga agregada engloba todos os trabalhos que se encontram no espaço fabril, incluindo os que já foram processados no centro de trabalho. Esta carga é normalmente designada de carga agregada alargada L_s^{AA} (Oosterman *et al.*, 2000). Isto significa que um trabalho contribui para a carga de um centro de trabalho, desde que é lançado para o espaço fabril até que conclui todas as suas operações. Consequentemente, o trabalho é incluído na carga de todos os centros de trabalho do seu roteiro de fabrico ao mesmo tempo, i.e. no momento em que é lançado, sendo excluído de todas as cargas também ao mesmo tempo, i.e. quando é concluído. Neste caso, para cada centro de trabalho são estabelecidas normas para a carga agregada alargada, i.e. para a soma da carga directa com a carga a montante e com a carga a jusante do centro de trabalho.

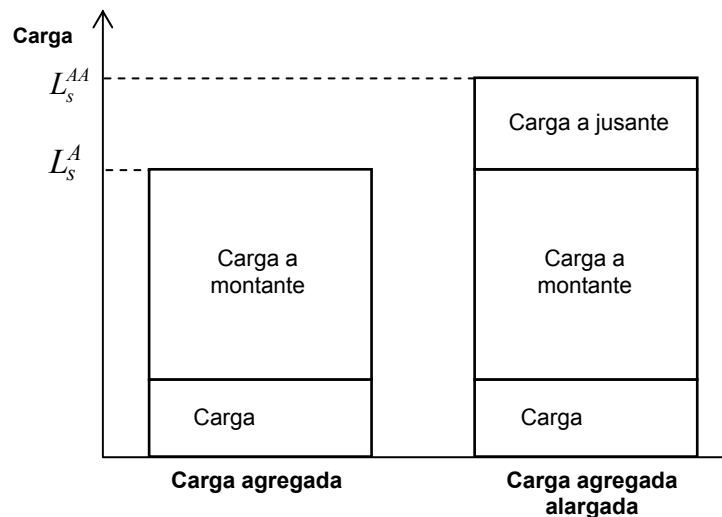


Figura 2.6: Carga agregada e carga agregada alargada.

2.3.1 Load Oriented Order Release (LOOR)

Este mecanismo, com base nos trabalhos disponíveis para lançamento, selecciona, periodicamente, aqueles que são urgentes, tendo em conta a capacidade disponível. A carga no espaço fabril é limitada por intermédio de normas, indicando estrangulamentos momentâneos e assinalando ajustes de capacidade, se tal for possível. O mecanismo é baseado em quatro parâmetros, nomeadamente, o *lead time* nos centros de trabalho, o período de libertação, o limite temporal e o limite de carga, desenvolvendo-se em três passos principais.

O primeiro passo identifica os trabalhos urgentes. O mecanismo começa por determinar, para cada um dos trabalhos que se encontram na *pool*, uma data planeada de libertação. Isto é feito por programação regressiva a partir das datas de entrega, usando os *lead times* nos centros de trabalho. De seguida, os trabalhos são ordenados pela sua urgência de acordo com a data planeada de libertação. Aqueles que se encontram dentro de um limite temporal, previamente estabelecido, são considerados urgentes. O limite temporal restringe, portanto, o conjunto de trabalhos considerados para lançamento, aqueles que são urgentes. A Figura 2.7 ilustra o procedimento. Três dos trabalhos planeados são considerados urgentes, nomeadamente o 1, 3 e 2 (por esta ordem). O trabalho 4 é remetido para o próximo período de libertação, uma vez que a sua data planeada de libertação cai fora do limite temporal considerado.

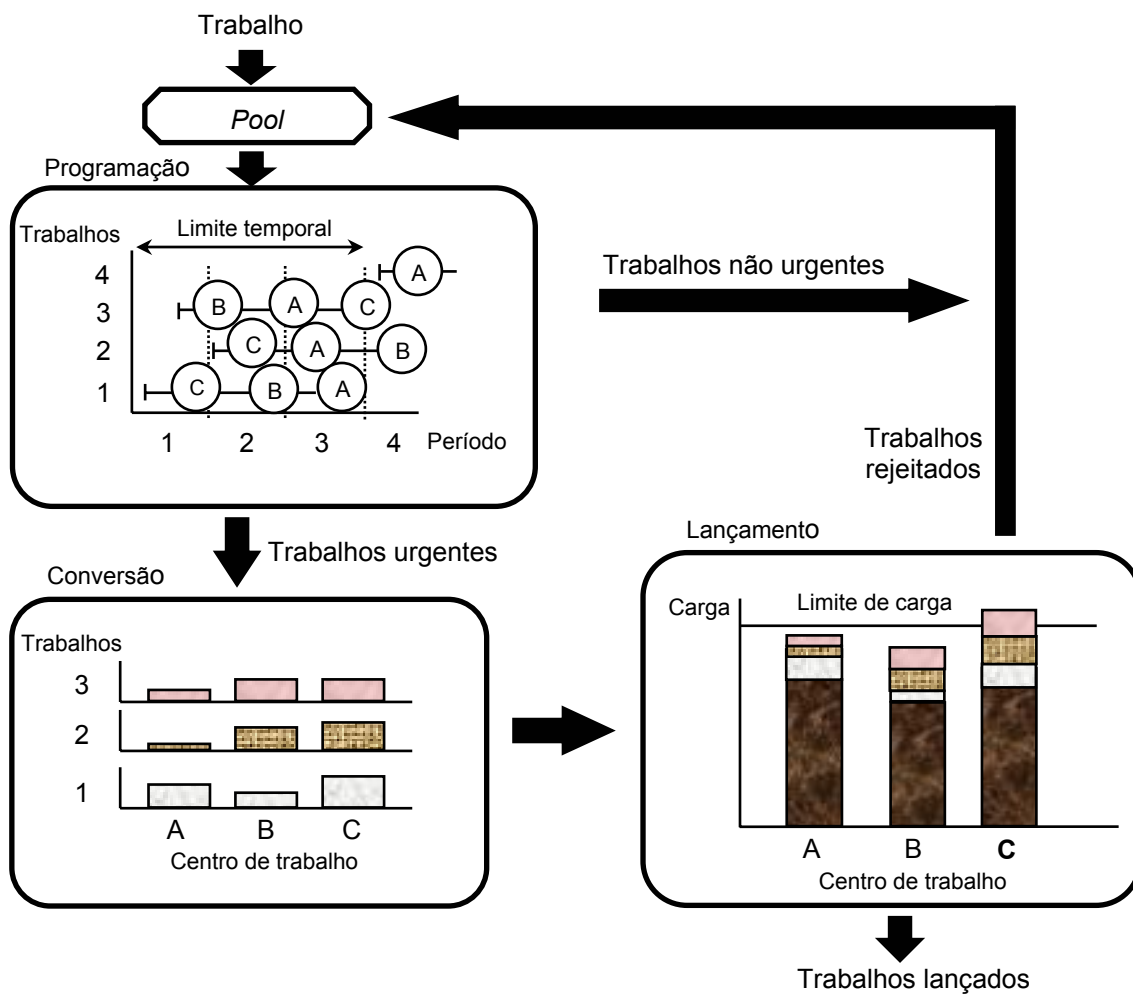


Figura 2.7: Passos principais do mecanismo LOOR (Bechte, 1994).

O segundo passo permite determinar a contribuição dos trabalhos urgentes para a carga dos centros de trabalho, através do método de conversão da carga. O mecanismo considera que durante o período de libertação, uma fracção da carga que chega ao centro de trabalho é processada, passando para os centros de trabalho a jusante. De facto, se a carga de um centro de trabalho s atingir o seu limite de carga LL_s , será de esperar que uma fracção PO_s/LL_s da carga, passe para o centro de trabalho que realiza a operação seguinte, ver Figura 2.2.

A equação 2.6 estabelece a probabilidade de um trabalho, i , a aguardar pela primeira operação, atingir um centro de trabalho s que realiza a k -ésima das operações que faltam realizar, durante o período de libertação considerado, em função das saídas planeadas (PO) e do limite de carga (LL) estabelecido para o centro de trabalho. Esta probabilidade ($DF_{i,s}$) é designada de *factor de depreciação* e é igual à probabilidade do trabalho passar todos os centros de trabalho, do seu roteiro de fabrico, que se encontram a montante de s (conjunto $U_{i,s}$).

$$DF_{i,s} = \prod_{j \in U_{i,s}} \left(\frac{PO_j}{LL_j} \right) \quad (2.6)$$

No mecanismo LOOR é usual expressar o limite de carga em percentagem das saídas planeadas. O valor calculado desta forma é designado de percentagem de carga (LPG¹), sendo definido como:

$$LPG = \frac{LL}{PO} \times 100 \quad (2.7)$$

A equação 2.6 pode então ser reescrita como:

$$DF_{i,s} = \prod_{j \in U_{i,s}} \left(\frac{100}{LPG_j} \right) \quad (2.8)$$

Se todos os centros de trabalho tiverem a mesma percentagem de carga, a equação 2.8 pode ser simplificada:

¹ É possível demonstrar, através das relações indicadas na Figura 2.2, que a percentagem de carga (LPG) se encontra relacionada com o *lead time* (LT) de um centro de trabalho e com o período planeamento ou de libertação (RP) da seguinte forma:

$$LPG = \left(1 + \frac{LT}{RP} \right) \times 100$$

$$DF_{i,s} = \left(\frac{100}{LPG} \right)^{k-1} \quad (2.9)$$

Finalmente, a contribuição dos trabalhos a montante de s (conjunto I_{Us}), para a carga convertida L_s^C é determinada multiplicando o factor de depreciação pelo tempo de processamento $p_{i,s}$ destes em s :

$$L_s^C = \sum_{i \in I_{Us}} DF_{i,s} \cdot p_{i,s} \quad (2.10)$$

Note-se que o método de conversão leva em consideração a posição dos trabalhos, que se encontram a montante de s no momento do lançamento. Assim, de acordo com a equação 2.10, um trabalho que, por exemplo, tenha um tempo de processamento de 1 hora, num centro de trabalho com uma LPG de 150%, contribuirá com 1 hora para a carga ajustada deste, se o centro realizar a primeira das operação que faltam realizar, com 0,67 horas se realizar a segunda dessas operações, com 0,44 horas se realizar a terceira, etc.

No terceiro passo, os trabalhos urgentes são considerados para lançamento. Pela sequência estabelecida, os trabalhos são carregados nos respectivos centros de trabalho, desde que o limite de carga não seja excedido em nenhum dos centros de trabalho envolvidos. Em caso de lançamento, a carga dos centros de trabalho é actualizada em conformidade. Na Figura 2.7, dois dos três trabalhos considerados, são lançados. O terceiro, uma vez que faz exceder o limite de carga num dos centros de trabalho é rejeitado. Os trabalhos rejeitados, tendo prioridade mais elevada, possuem mais possibilidades de serem lançados no próximo período de libertação. Se a capacidade for flexível o mecanismo assinala adequadamente a situação para a tomada de decisão. No caso da capacidade ser ajustada, o passo três necessita de ser repetido.

Knolmayer (1991) nota, contudo, que o mecanismo negligencia a influência da decisão de lançamento após o período de libertação. Os trabalhos que após este período, se encontrem posicionados bastante mais a jusante do centro de trabalho, do que o planeado, dificilmente terão contribuído para a carga contabilizada. Isto significa que em situações em que o período de libertação é reduzido, a carga convertida poderá incluir muitos trabalhos destes, resultando em cargas directas elevadas em períodos

futuros. Nessas situações, a futura decisão de lançamento não poderá fazer mais, do que bloquear o lançamento.

2.4 Características e aplicabilidade do WLC

Uma importante e óbvia característica do WLC é a protecção dos recursos do espaço fabril de perturbações, decorrentes da variabilidade do processo produtivo e da incerteza da procura. Isto acontece porque o controlo realizado pelo WLC é baseado na manutenção de *buffers* de WIP para cada centro de trabalho, através da manutenção da carga dentro dos valores definidos pelas normas. Embora as filas de espera resultantes protejam os recursos de perturbações no processo produtivo, associadas a avarias de máquinas e outro equipamento, a variações nos tempos de preparação, de processamento e de manuseamento, ao absentismo dos operadores e a outros factores, a principal protecção é colocada antes do espaço fabril pela *pool*. A *pool* absorve as flutuações da procura, o que permite manter as filas de espera do espaço fabril relativamente reduzidas e controladas.

Um outro aspecto importante resultante do controlo das cargas é a criação de uma situação mais transparente no espaço fabril (Melnyk e Ragatz, 1989), reduzindo a dependência do controlo da actividade de produção do uso de regras de prioridade sofisticadas ao nível do despacho (Bechte, 1988). Se os trabalhos forem lançados directamente, sem passar pela *pool*, estrangulamentos e conflitos relativos à urgência destes têm de ser resolvidos no espaço fabril. No WLC a *pool* é usada para visualizar possíveis problemas numa fase prévia, facilitando o ajuste de capacidade ou a alteração das datas de entrega, quando possível.

No WLC a decisão de lançamento, ao contrário da decisão de despacho, é tomada de uma forma centralizada, o que permite comparar a urgência dos trabalhos e balancear as cargas entre centros de trabalho. O balanceamento centralizado das cargas, seleccionando trabalhos da *pool* que respeitem as normas, pretende manter as filas de espera do espaço fabril estáveis, apesar das flutuações que se possam verificar na procura. Se as cargas apenas forem restringidas isso poderá resultar no aparecimento de tempos mortos, como observado por Kanet (1988), Melnyk *et al.* (1991) e outros. Para

evitar isto o WLC permite a selecção de trabalhos menos urgentes, sempre que os trabalhos mais urgentes fazem exceder as normas de carga.

O uso de normas no WLC permite, ainda, evitar a síndrome do *lead time* descrita por Plossl (1988), ver Figura 2.8. A síndrome do *lead time* resulta da falsa conclusão de que para evitar incumprimentos das datas de entrega, face aos longos tempos de percurso, devem ser planeados *lead times* de produção mais alargados para propósito de programação regressiva. Contudo, se estes forem alargados os trabalhos são lançados mais cedo e o WIP no espaço fabril aumenta. Em média isto significa tempos de espera nas filas e tempos de percurso no espaço fabril ainda mais alargados. O resultado é o agravamento da situação, em vez de a melhorar. Aumentando os tempos de percurso a reacção natural é novamente aumentar os *lead times* de produção, criando um ciclo vicioso. O WLC quebra este ciclo vicioso restringindo o lançamento por normas de carga.

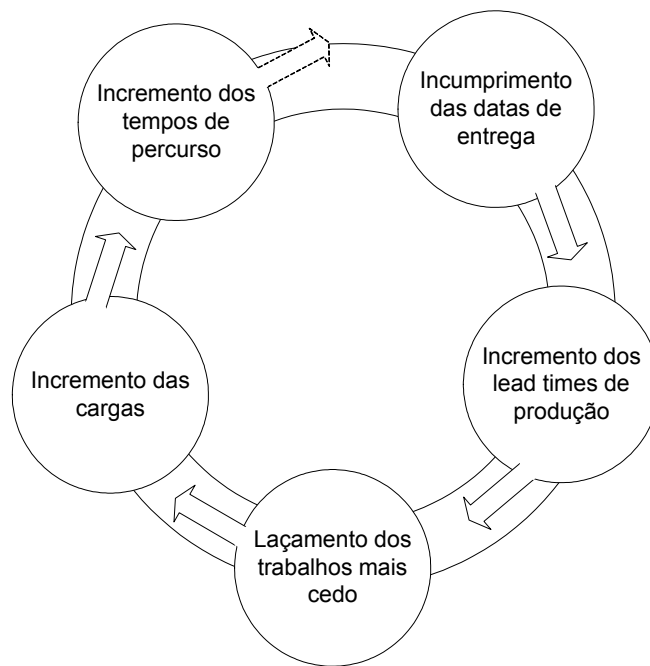


Figura 2.8: Síndrome do *lead time* (Plossl, 1988).

Embora o uso de normas para a carga agregada evite estimar a contribuição dos trabalhos a montante para a carga directa dos centros de trabalho, a determinação de valores adequados para estas normas é mais difícil. Os roteiros de fabrico devem ser considerados. De facto, os centros de trabalho que se encontram posicionados mais a jusante, i.e. que tipicamente executam operações de acabamento, requerem normas mais

alargadas do que os centros de trabalho posicionados mais a montante. A posição de um centro de trabalho reflecte o número médio de operações dos trabalhos entre o seu lançamento e o seu processamento no centro. A abordagem da carga agregada requer, assim, a definição de múltiplas e específicas normas de carga, de acordo com a posição de cada um dos centros de trabalho. A dificuldade aumenta, uma vez que será de esperar que a posição dos centros de trabalhos se altere com a mistura de produtos. Neste caso, as normas de carga necessitam de ser continuamente revistas. As normas para a carga ajustada de um centro de trabalho podem, mais facilmente, ser relacionadas com o *lead time* do centro. Neste caso o valor da norma deixa de ser dependente dos roteiros de fabrico dos trabalhos.

Em geral, de acordo com Henrich *et al.* (2004), a aplicabilidade do WLC aumenta com a variabilidade resultante de flutuações na taxa de chegada, em diferenças nas datas de entrega dos trabalhos, nos tempos de processamento e na dimensão e sequência dos roteiros de fabrico. Os autores consideram, ainda, que operações de montagem e tempos de preparação dependentes da sequência de processamento podem causar problemas na aplicabilidade do WLC.

Capítulo 3

Mecanismos de Controlo da Actividade de Produção: revisão e classificação

Os mecanismos de Controlo da Actividade de Produção (CAP) são de importância estratégica para o sucesso económico das empresas (Wiendahl, 1995), influenciando significativamente critérios como o prazo de entrega, a entrega atempada, o WIP e a utilização dos recursos. Por esta razão uma quantidade considerável de mecanismos tem sido proposta na literatura.

Este capítulo faz uma revisão das principais abordagens ao controlo da actividade de produção, com particular ênfase para os mecanismos baseados em Workload Control (WLC). Procura-se, essencialmente, questionar e compreender as diferenças entre os mecanismos, com o intuito de facilitar a sua selecção, implementação e melhoria. Neste âmbito, são analisadas e discutidas as principais dimensões dos mecanismos de CAP e para cada dimensão, as diferentes estratégias de controlo que é possível usar. As dimensões consideradas permitem descrever as características e propriedades fundamentais destes mecanismos.

Neste capítulo, procura-se ainda investigar a possibilidade de integrar muitos dos mecanismos baseados em WLC, que têm sido propostos na literatura, num modelo genérico conceptual. Em particular, pretende-se responder à questão: como desenvolver mecanismos de WLC *customizados* e adaptados a situações produtivas específicas?

A verificar-se a possibilidade de desenvolver um modelo genérico conceptual, será possível configurá-lo e adaptá-lo a realidades ou instâncias industriais diferentes, podendo, desta forma, especificarem-se mecanismos adequados e orientados a situações concretas e particulares de produção. O modelo poderá ser utilizado como instrumento de projecto de mecanismos de WLC, na prática industrial e/ou como instrumento de investigação e desenvolvimento de novos mecanismos pela comunidade científica.

O capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: na secção 3.1 é efectuada uma revisão dos mecanismos de CAP que têm vindo a ser propostos na literatura; na secção 3.2 são discutidos ajustes e extensões à classificação desenvolvida por Bergamaschi *et al.* (1997) para os mecanismos de CAP; por último, na secção 3.3 é proposto um modelo genérico conceptual que permite agregar a carga a diferentes níveis de detalhe.

3.1 Mecanismos de controlo da actividade de produção

Uma forma de controlar, ou regular, o fluxo de trabalho *para e dentro* do espaço fabril, consiste no uso de mecanismos de CAP. Estes actuam quer sobre os trabalhos que se encontram na *pool*, quer sobre os trabalhos que se encontram no espaço fabril, determinando o *momento* e os *trabalhos* a lançar e/ou a processar nos diversos recursos.

Diversos autores referem-se aos mecanismos de CAP estritamente do ponto de vista do lançamento, enquanto outros o fazem do ponto de vista do controlo do fluxo de materiais. Contudo, os mecanismos não devem ser míopes, i.e. não devem equacionar isoladamente a problemática do lançamento ou a do controlo do fluxo de materiais, mas ambas em simultâneo. A razão prende-se com o facto, das decisões de lançamento afectarem e serem afectadas pelas decisões de controlo do fluxo de materiais. Ambos os problemas estão relacionados, impondo a resolução de um, formas de resolução do outro e vice-versa. Por isso, podem ser vistos mais como duas componentes do mesmo problema, nomeadamente, o Controlo da Actividade de Produção, do que dois problemas verdadeiramente distintos.

A função Lançamento identifica as ordens de produção, ou trabalhos, a lançar para o espaço fabril e determina o seu momento de lançamento ou libertação. A função de Controlo do Fluxo de Materiais coordena o fluxo de trabalhos e as necessidades de produção ao longo do processo produtivo. Envolve essencialmente a activação dos

centros de trabalho e a tomada de decisão relativamente à movimentação de material entre estes. Em alguns mecanismos a disponibilidade de materiais é suficiente para activar a produção, i.e. para iniciar o processamento, noutras condições adicionais de controlo devem ser satisfeitas. Neste contexto, o despacho é claramente importante no controlo do fluxo de materiais. Logo que as condições para a activação do centro de trabalho estão criadas, regras de prioridade são usadas para determinar a ordem pela qual os trabalhos, em fila de espera, devem ser seleccionados e despachados para processamento. Esta decisão influencia a disponibilidade de trabalhos noutras centros de trabalho e, conseqüentemente, o lançamento de novas ordens de produção ou trabalhos para o espaço fabril.

Diversos mecanismos têm sido desenvolvidos para o controlo da actividade de produção. Graves *et al.* (1995), Bergamaschi *et al.* (1997) e Fowler *et al.* (2002) reviram a literatura sobre vários destes mecanismos. Alguns dos mais frequentemente referidos na literatura são: BSC, MRP, kanban, Synchro-MRP, CONWIP, workload regulation (WR), starvation avoidance (SA), LOOR, LUMS e POLCA.

O BSC - *Base Stock Control* (Clark e Scarf, 1960, Kimball 1988), opera transmitindo simultaneamente a todos os centros de trabalho a informação da procura, logo que esta ocorre. De imediato, os centros de trabalho solicitam aos centros a montante, os materiais que necessitam para iniciar a produção. O BSC mantém uma quantidade inicial de existências, designada de *base stock*, em cada centro de trabalho. O propósito é garantir a disponibilidade de materiais em toda a cadeia de valor do fluxo de materiais ou cadeia de produção, reduzindo os prazos de produção. Este mecanismo não reconhece, contudo, a necessidade de limitar a quantidade de trabalho no espaço fabril.

A importância do lançamento controlado permaneceu por reconhecer durante várias décadas. Wight (1970) e Plossl e Wight (1973) pioneiros do *Manufacturing Resources Planning* (MRPII), uma evolução do *Materials Requirement Planning* (MRP) (Orlicky, 1975), foram talvez os primeiros a advogar a regulação do fluxo de entrada de trabalhos no sistema produtivo, como forma de controlar o WIP e conseqüentemente os *lead times* de produção. Contudo, as ideias destes autores aparentam estar em conflito com a filosofia do MRP que impõe datas de lançamento para os trabalhos.

Para determinar as datas de lançamento o MRP subtrai os *lead times* de produção das datas de entrega dos trabalhos. Este processo de desfasamento de execução de umas

actividades em relação a outras, começa com os produtos finais e propaga-se ao longo da lista de materiais, desde o nível mais elevado até ao nível mais baixo, proporcionando um programa de lançamentos, e de execução, nos diferentes centros de trabalho da cadeia de produção. Para geração deste programa, o MRP tende a assumir capacidade infinita e valores de *lead times* que ignoram a variabilidade dos tempos de percurso dos trabalhos no espaço fabril.

O aparecimento da filosofia de produção *Just In Time* (JIT), com origem no Japão, veio sublinhar a importância do lançamento controlado. O JIT está na origem do *Toyota Kanban System* (TKS) (Sugimori *et al.*, 1977), um mecanismo usado com sucesso desde o final dos anos setenta em todos os países industrializados. O TKS limita o nível de existências ou WIP nos centros de trabalho, limitando implicitamente o WIP no espaço fabril. Na sua forma mais simples, cada centro de trabalho é constituído por uma máquina e um *buffer* de saída. Se o nível de existências nestes *buffers*, cair abaixo de um valor previamente definido, a máquina é autorizada a produzir de forma a repor as quantidades consumidas, caso contrário, permanece inactiva. Para isto são usados kanbans, i.e. cartões, em cada centro de trabalho do espaço fabril, os quais funcionam como autorizações de produção. Em geral, estes cartões são específicos do tipo de trabalho a executar. Para uma discussão detalhada do TKS remete-se para Monden (1983) ou Berkley (1992).

Existem diversas variações do TKS relativamente à forma como este pode ser implementado. So e Pinault (1988), por exemplo, propõem uma das mais conhecidas variações ao TKS, designada de *minimal blocking*. Neste caso, além do *buffer* de saída, é adicionado a cada centro de trabalho um *buffer* de entrada. Segundo os autores, esta abordagem facilita a recuperação a partir de avarias, mantendo os recursos críticos em operação mesmo quando há centros de trabalho, a jusante, bloqueados. Berkley (1992) identificou vinte e quatro parâmetros que são necessários especificar para a completa caracterização do modo de operação de um sistema kanban.

Spearman *et al.* (1990) introduziram o mecanismo *CONstant Work in Progress* (CONWIP) numa tentativa de estender os benefícios do JIT a ambientes produtivos onde o TKS é considerado inapropriado. Hall (1981) refere que o TKS é intrinsecamente um mecanismo para a produção repetitiva. O CONWIP, pelo contrário, pode ser aplicado a uma maior diversidade de ambientes produtivos (Spearman *et al.*,

1990). O mecanismo limita a quantidade total de trabalhos no espaço fabril, permitindo variações na mistura destes e na sua localização, o que não acontece no TKS. Isto é usualmente feito usando cartões que são atribuídos aos trabalhos, no momento em que são lançados para o espaço fabril. Quando o limite de WIP no espaço fabril é alcançado, o lançamento de novos trabalhos só pode ser autorizado pela conclusão de trabalhos previamente lançados, ou pelo consumo de produtos acabados. O CONWIP é conceptualmente similar ao controlo de entradas e saídas (Wight, 1970), diferindo deste no aspecto de estar focado no controlo do WIP e não no controlo da taxa de produção. Mecanismos similares ao CONWIP têm sido propostos por diversos autores, são exemplos: o C-WIP (Glassey e Resende 1988); o *long-pull system* (Lambrecht e Segaert, 1990); o *maximum shop load* (Salegna e Park, 1996) e o CONLOAD (Rose, 1999), entre outros. Para uma descrição detalhada do CONWIP remete-se para Framinan *et al.* (2003).

Ao mesmo tempo que o interesse pelo JIT e pelo TKS crescia, a teoria das restrições (*Theory of Constraints* - TOC) desenvolvida no final dos anos setenta por Eliyahu Goldratt, começou a despertar o interesse quer de investigadores, quer de gestores industriais. Goldratt e Cox (1984) e Goldratt e Fox (1986) reconheceram que a taxa de produção do sistema depende frequentemente do processo que restringe a capacidade, i.e. do recurso crítico e que este deve ser operado a 100%. No entanto, como sugerem Hopp e Spearman (1996) no seu livro, *Factory Physics*, aumentar a utilização do sistema, sem efectuar qualquer outra alteração, resulta num aumento não linear dos tempos de percurso. Os autores da TOC propuseram, assim, um mecanismo que designaram de *Drum-Buffer-Rope* (DBR), o qual resulta numa quantidade constante de WIP a montante do recurso crítico. A ideia é proteger o recurso crítico de perturbações que possam conduzir à sua paragem por falta de material. Este mecanismo é também conhecido por *Workload Regulation* (WR) (Wein, 1988).

Glassey e Resende (1988) propuseram um mecanismo similar ao WR designado de *Starvation Avoidance* (SA). O mecanismo difere do WR na forma como trata os fluxos reentrantes. Enquanto o WR considera o trabalho total em rota para o centro de trabalho crítico, o SA considera apenas os trabalhos que se espera que cheguem a este centro de trabalho pela primeira vez após o lançamento, i.e. não inclui a recirculação de trabalhos. A recirculação ocorre quando um trabalho processado num centro de trabalho necessita

de regressar a ele, para realizar uma outra operação. O SA difere, ainda, na forma como calcula a carga a montante do recurso crítico, considerando o tempo de reparação do recurso crítico, devido a eventuais avarias, como parte desta.

No início dos anos oitenta surgiram três conceitos principais de WLC: o mecanismo *Load Oriented Order Release* (LOOR) (Bechte 1980, Bechte, 1994, Wiendahl, 1995), a abordagem de Bertrand e Wortmann (1981) e a abordagem de LUMS (Lancaster University Management School) (Tatsiopoulos, 1983, Hendry e Kingsman, 1991, Stevenson e Hendry, 2006). Os mecanismos operam de forma similar, regulando a carga no espaço fabril por intermédio de normas, i.e. limites de carga, e tomando periodicamente as decisões de lançamento. Embora similares na forma como procedem ao lançamento de trabalho para o espaço fabril, diferem substancialmente na forma como contabilizam a carga lançada. Extensões e melhorias a estes mecanismos têm sido propostas por diversos autores, ver por exemplo Oosterman *et al.* (2000) e Breithaupt *et al.* (2002).

Land e Gaalman (1998) propuseram um mecanismo para *workload control* designado de *Superfluous Load Avoidance Release* (SLAR), o qual é descrito por Breithaupt *et al.* (2002) como um ponto de partida para o controlo da carga sem recorrer ao uso de normas. Recentemente, Stevenson e Hendry (2005b) adicionaram uma funcionalidade *web* ao WLC, com o intuito de melhorar a aplicabilidade prática do conceito, no âmbito da sua integração numa *supply chain*, designando-o de eWLC.

Suri (1998) introduziu o mecanismo POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) como parte de uma estratégia global de *Quick Response Manufacturing* (QRM). O mecanismo controla o lançamento e o fluxo de trabalhos ao longo do espaço fabril, usando uma combinação de autorizações de libertação e autorizações de produção. O POLCA requer em cada centro de trabalho, a geração de uma lista de ordens de produção com uma data planeada de libertação associada. O mecanismo é implementado como um sistema de cartões, os quais são atribuídos a pares de células². Tal como no CONWIP, mas ao contrário do TKS, os cartões são genéricos, i.e. não são específicos de um particular tipo de trabalho. Para informação adicional acerca do mecanismo POLCA remete-se para Suri e Krishnamurthy (2003). Vandaele *et*

² Subsistema produtivo organizado segundo a Tecnologia de Grupo

al. (2005) implementaram o mecanismo POLCA com um sistema de cartões virtuais. Os autores designaram esta variação do mecanismo de ePOLCA. Fernandes e Silva (2006) propõem-se uma versão deste mecanismo, designada de gPOLCA, a qual não necessita da geração de datas de libertação para cada centro de trabalho, um requisito necessário no POLCA, ver capítulo 5. O mecanismo constitui um importante passo para tornar os princípios POLCA adequados à produção em *job shop* em ambiente de produção por encomenda.

Outros autores têm proposto mecanismos híbridos. Estes combinam alguns dos mecanismos previamente apresentados, com o intuito de alcançar os benefícios resultantes dos mecanismos envolvidos. Alguns exemplos são o *Synchro-MRP* (Hall, 1981) que combina o MRP e o TKS, o *Generalized Kanban Control* (Buzacott, 1989) e o *Extended Kanban Control* (Dallery e Liberopoulos, 1995) que combinam o BSC e o TKS, e o *two-boundary hybrid* (Bonvik *et al.*, 1997) que combina TKS e o CONWIP. Recentemente Riezebos *et al.* (2003) desenvolveram uma abordagem para a integração do DBR com o WLC.

3.2 Dimensões dos mecanismos de controlo da actividade de produção

Um mecanismo de CAP tem uma envolvente caracterizada por várias dimensões, as quais descrevem as suas características e propriedades fundamentais. Em cada dimensão existem diferentes alternativas, ou estratégias, que resultam da instanciação de parâmetros definidores das dimensões.

Bergamaschi *et al.* (1997) classificam os mecanismos de CAP com base em oito dimensões: lançamento; convenção temporal; medição da carga; agregação da carga; contabilização da carga ao longo do tempo; controlo da carga; planeamento da capacidade e visibilidade do programa de lançamentos planeados. Algumas destas dimensões foram previamente desenvolvidas por autores como Melnyk e Ragatz (1988, 1989).

Nesta secção, a classificação de mecanismos de CAP é ampliada, relativamente a algumas das dimensões consideradas, nomeadamente o lançamento, a convenção temporal e a agregação da carga, sendo ainda introduzida uma nova dimensão: o controlo do fluxo de materiais. Esta ampliação permite a inclusão de uma classe

importante de mecanismos descritos por Fernandes e Silva (2005) como de reposição de existências. A classificação proposta é apresentada na Tabela 3.1 e discutida nas secções seguintes.

3.2.1 Lançamento

Bergamaschi *et al.* (1997) classificam os mecanismos de CAP, relativamente à estratégia de lançamento, em dois tipos: faseado no tempo e limitação de carga. Contudo, autores como Spearman e Zazanis (1992), Wisner (1995) e Sabuncuoglu e Karapinar (1999) propõem outras formas de classificação para esta dimensão. Spearman e Zazanis (1992), por exemplo, classificam os mecanismos como sendo do tipo *push*, *pull* ou híbrido *push-pull*. Segundo os autores, a estratégia *push* programa o lançamento de trabalhos para o espaço fabril com base num Programa Director de Produção, controlando a taxa de produção e medindo o WIP, i.e. a taxa de produção é a variável de controlo. O MRP operando sem o módulo de controlo de entradas/saídas presente no MRPII, é um exemplo de um mecanismo que usa uma estratégia *push* pura. A estratégia *pull*, por outro lado, autoriza o lançamento de trabalhos para o espaço fabril, controlando o WIP e medindo a taxa de produção (Spearman e Zazanis, 1992), i.e. o WIP é a variável de controlo. O TKS operando sem cotas de produção, para representar as quantidades requeridas por período, é um exemplo de um mecanismo que usa uma estratégia *pull* pura.

Em sistemas produtivos reais, não é vulgar encontrar mecanismos que sigam estratégias *push* ou *pull* puras, como as indicadas, mas abordagens híbridas que combinam os paradigmas *push* ou *pull* com alguma forma de *feedback* relativa ao estado do espaço fabril ou às datas de entrega.

A estratégia *pull* encontra-se relacionada com a estratégia de limitação de carga apresentada por Bergamaschi *et al.* (1997) e com a estratégia de reposição de existências referida por Fernandes e Silva (2005). A estratégia *push* está, por outro lado, relacionado com a estratégia de lançamentos faseados no tempo (Bergamaschi *et al.*, 1997). Esta é designada no âmbito deste trabalho de datas programadas.

A estratégia de datas programadas, usada em mecanismos como o MRP, procura determinar uma data de libertação para cada trabalho, permitindo que estes sejam

lançados para o espaço fabril, quando essa data é atingida sem, contudo, atender ao estado de congestionamento do espaço fabril. A data programada ou planeada de libertação é, geralmente, obtida, por subtracção do *lead time* de produção da data em que o trabalho é requerido, para expedição ou para montagem, utilizando para tal informação acerca dos trabalhos que se encontram na *pool*, nomeadamente a data de entrega, o conteúdo do trabalho e o roteiro de fabrico. A estratégia de limitação de carga, usada em mecanismos como o WR e o SA e em algumas implementações do mecanismo CONWIP (v.g. Roderick *et al.*, 1992), pelo contrário, usa informação acerca do estado do espaço fabril, ignorando, contudo, informação sobre as datas de entrega. Neste caso, os trabalhos são lançados atendendo às suas características distintivas e à carga no espaço fabril. É assegurado que cada centro de trabalho só processa trabalhos para os quais foi previamente reservada capacidade. O nível de detalhe da informação usada sob o estado do espaço fabril pode, contudo, variar de mecanismo para mecanismo; ver secção 3.2.5.

A outra classe de estratégias *pull* é baseada na reposição de existências. Esta pode ser identificada em mecanismos como o TKS e o CONWIP (v.g. Bonvik *et al.*, 1997). A estratégia de reposição de existências procura manter uma quantidade mínima de WIP no sistema ou em determinados pontos deste. Neste caso, o lançamento de novos trabalhos é autorizado pelo consumo de produto acabado, ou WIP, sem que as encomendas dos clientes tenham um impacto directo nas ordens de produção, i.e. assume-se que existe procura para os produtos produzidos. A estratégia é geralmente implementada associando cartões, ou autorizações de produção, aos trabalhos. Note-se que em situações de produção de uma elevada variedade de produtos por encomenda e/ou produtos personalizados, mecanismos de reposição de existências como TKS, conduzem frequentemente à proliferação de WIP. Por outro lado, quando a empresa concebe e produz os produtos de acordo com as especificações dos clientes, a aplicação destes mecanismos torna-se mesmo impossível. Os produtos não são conhecidos até ao momento em que a encomenda é recebida e como tal, não existem produtos predefinidos em stock que possam ser repostos.

É ainda possível identificar mecanismos híbridos, como a abordagem de LUMS ou o LOOR, que combinam as estratégias de datas programadas e de limitação de carga, ou

como o Synchro-MRP que combina as estratégias de datas programadas e de reposição de existências.

Uma outra estratégia correntemente utilizada para proceder ao lançamento de trabalhos para o espaço fabril é o lançamento imediato. Neste caso, os trabalhos são lançados de imediato, logo que materiais e equipamentos ficam disponíveis, sem usar informação sobre o estado do espaço fabril ou as características dos trabalhos a lançar. Por exemplo, no mecanismo Base Stock Control (BSC), um exemplo paradigmático de lançamento imediato, a procura de produtos finais é transmitida de imediato a todos os centros de trabalho do roteiro de fabrico do trabalho.

Assim, procurando integrar as abordagens acima referidas, os mecanismos de CAP podem ser classificados relativamente à estratégia de lançamento de trabalhos para o espaço fabril como (Tabela 3.1): (a) lançamento imediato; (b) datas programadas; (c) limitação de carga; (d) reposição de existências; (e) híbrido de datas programadas e limitação de carga ou (f) híbrido de datas programadas e reposição de existências.

3.2.2 Controlo do fluxo de materiais

Relativamente à estratégia de controlo do fluxo de materiais, os mecanismos podem ser classificados como (Tabela 3.1): (a) *push* ou (b) *pull*. Deve notar-se que os conceitos de *push* e *pull*, tal como definidos por Spearman e Zazanis (1992), não são coincidentes com aqueles aqui usados e também expressos por Tayur (1993), os quais estão relacionados com a estratégia de controlo do fluxo de materiais.

Frequentemente, a existência de materiais é suficiente para activar a produção nos centros de trabalho. Com a conclusão de um trabalho num centro de trabalho, este é simplesmente empurrado (*pushed*) para o próximo centro de trabalho e deste para outros, até que todas as operações sejam executadas. Neste caso, o sistema opera segundo uma estratégia *push* de controlo do fluxo de materiais, iniciando a produção sempre que existe material para ser processado, independentemente dos níveis de existências nos centros de trabalho a jusante. São exemplo desta situação os mecanismos MRP, CONWIP, LUMS e LOOR. Por outro lado, sob uma estratégia *pull* de controlo do fluxo de materiais, a produção num particular centro de trabalho é activada pela procura de materiais pelos centros de trabalho a jusante. O TKS é um exemplo paradigmático desta

situação. Os sistemas *pull* operam de forma a manter o centro de trabalho inactivo, mesmo quando existe material para processar, até que um sinal proveniente de centros de trabalho a jusante autorize a produção nesse centro de trabalho.

3.2.3 Convenção temporal

A convenção temporal determina quando os lançamentos podem ocorrer. Esta pode ser de três tipos (Tabela 3.1): (a) contínua; (b) discreta ou (c) híbrida.

Sob uma convenção temporal contínua os lançamentos podem ocorrer a qualquer momento durante a operação do sistema. Sob uma convenção temporal discreta os lançamentos ocorrem periodicamente, tipicamente, no início de cada período. Neste caso, é necessário especificar o período de libertação ou de lançamento: dia, semana ou outro. A convenção temporal tem implicações no esforço requerido para gerir a *pool* e os grupos de capacidade (máquinas, centros de trabalho, células, etc.) do sistema produtivo, determinando se as condições nestes devem ser monitorizadas numa base contínua ou periódica.

A estratégia de reposição de existências encontra-se, geralmente, associada à convenção temporal contínua. Esta estratégia usa vulgarmente cartões para fazer a monitorização do WIP nos diversos grupos de capacidade do sistema. Exemplos desta associação ocorrem nos mecanismos TKS e CONWIP. A estratégia de datas programadas encontra-se, também, frequentemente associada à convenção temporal contínua (Bergamaschi *et al.*, 1997). Contudo, do ponto de vista conceptual não existe qualquer restrição em ser associada com a convenção temporal discreta. Esta associação ocorre, por exemplo, no mecanismo MRP. Por outro lado, a estratégia de limitação de carga, não se encontra associada a nenhuma das convenções, havendo mecanismos que aplicam uma e outros que aplicam a outra. Por exemplo, o mecanismo LOOR usa uma convenção temporal discreta e o mecanismo WR usa uma convenção temporal contínua.

Embora a literatura faça referência a estes dois tipos alternativos de convenção temporal, contínua ou discreta, é possível pensar em situações híbridas, onde o lançamento contínuo coexista ou seja combinado com o lançamento discreto, i.e. periódico. Um exemplo desta situação ocorre na abordagem de LUMS, onde o lançamento periódico é complementado por duas opções adicionais, que os autores designam de lançamento

pull intermédio e lançamento forçado. O lançamento *pull* intermédio permite que, entre lançamentos periódicos, sejam lançados trabalhos para o espaço fabril de forma a evitar a paragem dos recursos por falta de material, desde que as normas de carga não sejam excedidas. O lançamento forçado permite ao utilizador lançar trabalhos particularmente urgentes, mesmo que as normas de carga sejam excedidas.

A classificação de Bergamaschi *et al.* (1997) relativamente à convenção temporal é assim ampliada para incorporar estratégias híbridas.

3.2.4 Medição da carga

Para efectuar novos lançamentos alguns mecanismos necessitam de conhecer a carga que se encontra no espaço fabril. Para tal é necessário proceder à sua medição. De acordo com a literatura, a medição da carga pode ser efectuada (Tabela 3.1): (a) em termos do número de trabalhos ou (b) em termos da quantidade de trabalho, v.g. horas de trabalho. A quantidade de trabalho é usualmente calculada como uma agregação dos tempos de processamento dos trabalhos lançados.

Os mecanismos de reposição de existências, adequados em ambientes repetitivos de produção para stock de uma variedade limitada de produtos, usualmente medem a carga em termos do número de trabalhos. Os mecanismos de limitação de carga, frequentemente aplicados em ambientes de produção por encomenda, onde a variedade de produtos e a diversidade de tempos processamento tende a ser elevada, usualmente medem a carga em unidades de tempo.

Nos mecanismos de datas programadas não há necessidade de proceder à medição da carga, uma vez que estes não atendem ao estado do sistema para efectuar os lançamentos.

3.2.5 Agregação da carga

Os mecanismos de CAP, em particular os mecanismos de limitação de carga e os mecanismos de reposição de existências, podem ser classificados, relativamente à forma de agregação da carga, de acordo com as seguintes estratégias principais (Tabela 3.1): (a) carga total do sistema; (b) carga por centro de trabalho; (c) carga dos centros de trabalho críticos ou (d) carga por pares de centros de trabalho.

Cada estratégia corresponde a um nível diferente de agregação. Num extremo encontra-se a agregação da carga total do sistema. Esta estratégia é a menos detalhada, não proporcionando indicação de como a carga se encontra distribuída pelos diversos centros de trabalho. Por exemplo, o mecanismo CONWIP usa esta forma de agregação, lançando os trabalhos com base na carga total que se encontra no espaço fabril. No outro extremo encontra-se a agregação da carga por centro de trabalho. Nesta estratégia, a carga global do sistema é subdividida e registada para cada centro de trabalho. Neste caso, apenas os centros de trabalho do roteiro de fabrico de um particular trabalho, são monitorizados para determinar se este deve, ou não, ser lançado para o espaço fabril. Uma terceira alternativa consiste em registar a carga para os centros de trabalho críticos.

Note-se que a carga contabilizada num determinado centro de trabalho, pode referir-se à carga directa, à carga agregada ou à carga agregada alargada; ver secção 2.3. Por exemplo, enquanto o mecanismo LOOR contabiliza a carga agregada por centro de trabalho, o TKS contabiliza a carga directa e a abordagem de Tatsiopoulos (1983) contabiliza a carga agregada alargada. Os mecanismos SA e WR, orientados aos centros de trabalho críticos, contabilizam a carga agregada.

Em Bergamaschi *et al.* (1997) apenas são referidas estas três estratégias. Contudo, é possível identificar outras estratégias ou formas de agregação da carga. Um exemplo paradigmático é encontrado no mecanismo POLCA, onde a carga é agregada por pares de centros de trabalho, ou células, sucessivos no roteiro de fabrico do trabalho. Na secção 3.3 é apresentado um modelo genérico que permite representar estas e outras formas de agregação da carga.

3.2.6 Contabilização da carga ao longo do tempo

A dimensão contabilização da carga ao longo do tempo estabelece o momento e a carga a afectar a cada centro de trabalho. Esta dimensão influencia a forma como a carga se encontra distribuída ao longo do tempo. Relativamente a esta dimensão os mecanismos de CAP podem implementar três estratégias possíveis (Tabela 3.1): (a) atemporal; (b) probabilística ou (c) *time buckets* (períodos de tempo).

A estratégia baseada em períodos de tempo -*time buckets*- fica a dever-se essencialmente aos estudos de Bobrowski (1989), embora estudos anteriores como os de

Shimoyashiro *et al.* (1984) e Ragatz e Mabert (1988) tenham apresentado técnicas baseadas no mesmo princípio. Nesta estratégia, a carga é contabilizada ao longo do tempo em cada centro de trabalho. O horizonte temporal é subdividido em períodos de tempo (semanas, dias, turnos ou outro) e sempre que um trabalho é lançado, este adiciona carga aos *time buckets* que têm operações atribuídas. Começando com a última operação do trabalho ou, com a primeira, e fazendo um escalonamento regressivo, ou progressivo, respectivamente, das datas das operações com base nos *lead times* de produção, é determinado o período em que cada operação requer capacidade nos diversos centro de trabalho do roteiro de fabrico do trabalho. Se existir capacidade disponível num determinado período ou *time bucket*, então a operação é afectada ao centro de trabalho nesse período. Caso contrário a operação é afectada no período a mais próximo com capacidade disponível. Desta forma, a estratégia baseada em períodos de tempo procura determinar, para cada trabalho, o período em que cada operação será, previsivelmente, realizada em cada centro de trabalho. O *time bucket* é um importante parâmetro dos sistemas MRP, influenciando a frequência de replaneamento e afectando os *lead times* de produção (Riezebos, 2004). De facto os *lead times* num sistema MRP são sempre múltiplos do *time bucket* considerado. Assim, *time buckets* longos tendem a alongar os *lead times* de produção.

A estratégia probabilística fica a dever-se essencialmente aos estudos de Bechte (1994) e Wiendahl (1995). Por comparação com a estratégia baseada em períodos de tempo, esta centra-se apenas no primeiro período de tempo ou *time bucket* do horizonte de planeamento. A estratégia não procura determinar o período em que cada operação será realizada, mas estimar a probabilidade de cada trabalho, a lançar e em curso, ser processado em cada um dos centros de trabalho do seu roteiro de fabrico, durante o período de planeamento ou de libertação. Pressupõe, portanto, que se adopte uma convenção temporal discreta ou híbrida. Na estratégia probabilística a carga em cada centro de trabalho é calculada usando o *método de conversão* desenvolvido por Bechte (1980), multiplicando o tempo de processamento do trabalho, no centro de trabalho, pela probabilidade deste o alcançar durante o período de planeamento ou de libertação. O método de conversão é explicado em detalhe no capítulo 2. O mecanismo LOOR usa esta estratégia probabilística.

A estratégia atemporal tem vindo a ser desenvolvida desde os anos setenta, embora os principais estudos nesta área sejam mais recente (Glassey e Resende, 1988, Hendry e Kingsman, 1991, Philipoom *et al.* 1993 e Oosterman *et al.* 2000). Esta abordagem não proporciona indicação acerca da forma com a carga se encontra distribuída ao longo do tempo. Assim, aquando do lançamento de um trabalho para o espaço fabril, considera-se que este adiciona instantaneamente carga a todos os centros de trabalho por onde passa. Os mecanismos SA, WR, LUMS, CONWIP e TKS implementam esta abordagem.

A estratégia atemporal pode ser vista como uma simplificação da estratégia probabilística, em que o período de libertação é infinito e portanto, a probabilidade de um trabalho atingir um qualquer centro de trabalho durante o período de libertação é de 1. Similarmente, pode ser vista com uma simplificação da estratégia baseada em *time buckets*, em que o período de tempo ou *bucket* é tão longo quanto o horizonte temporal de planeamento, passando a existir apenas um *bucket*. Neste caso todas as operações programadas afectarão os centros de trabalho no mesmo período de tempo ou *bucket*.

3.2.7 Controlo da carga

Um dos principais objectivos dos mecanismos de CAP é o de regular a carga lançada para o espaço fabril. De acordo com a literatura, isto pode ser feito (a) balanceando a carga entre centros de trabalho ou limitando a carga lançada por (Tabela 3.1): (b) limite superior; (c) limite inferior ou (d) limite superior e inferior em simultâneo.

Uma abordagem típica ao controlo da carga consiste em autorizar o lançamento de um trabalho para o espaço fabril se, em consequência desse lançamento, a carga contabilizada, a um determinado nível de agregação, não exceder um limite superior previamente estabelecido. Esta estratégia é usada em mecanismos como o TKS, CONWIP e LOOR. Alternativamente, pode ser usado um limite inferior para a carga contabilizada no espaço fabril, a um determinado nível de agregação. Neste caso, sempre que a carga contabilizada fica abaixo do limite inferior, o lançamento de novos trabalhos é autorizado. Os mecanismos SA e WR operam desta forma, estabelecendo limites inferiores para a carga agregada dos centros de trabalho críticos. Adicionalmente, podem ser usados limites superiores em conjunto com limites inferiores, estabelecendo uma gama de variação da carga no espaço fabril. De acordo com esta estratégia, os trabalhos são lançados de forma a não exceder o limite superior estabelecido para cada

centro de trabalho, mas se isso acontecer e o limite inferior não tiver sido excedido, são lançados trabalhos adicionais para satisfazer a restrição do limite inferior. Neste caso, o mecanismo de CAP opera de forma a manter a carga contabilizada dentro desses limites. O mecanismo LUMS opera desta forma.

A estratégia de balanceamento da carga fica essencialmente a dever-se a estudos de autores como Irastorza e Deane (1974), Shimoyashiro *et al.* (1984) e Onur e Fabrycky (1987). Neste caso, o mecanismo de CAP procura lançar selectivamente trabalhos para o espaço fabril, de forma a minimizar o somatório dos desvios do balanceamento de cada centro de trabalho. Isto pode ocasionar, por exemplo, que alguns centros de trabalho possam ser ligeiramente sobrecarregados, se isso contribuir para melhorar o balanceamento global entre centros de trabalho.

3.2.8 Visibilidade do programa de lançamentos planeados

O programa de lançamentos planeados lida, essencialmente, com o fluxo de trabalhos entre o sistema de planeamento, *v.g.* o *Manufacturing Resources Planning*, e a *pool*, identificando todas as ordens de produção ou trabalhos considerados “maduros” pelo sistema de planeamento e, portanto, prontos para serem lançadas para o espaço fabril. A visibilidade deste programa, *i.e.* a capacidade de olhar para além do corrente período de tempo, pode ser (Tabela 3.1): (a) limitada ou (b) alargada.

Na visibilidade limitada, o mecanismo de CAP é apenas informado das ordens que se encontram maduras no corrente período, enquanto na visibilidade alargada, está a par do programa de lançamentos planeados para o período actual e para um futuro próximo. Nos mecanismos revistos na secção 3.1 a visibilidade do programa de lançamentos é limitada.

3.2.9 Planeamento da capacidade

Outro aspecto importante é o que diz respeito ao planeamento da capacidade, *i.e.* à habilidade do mecanismo para fazer ajustamentos de capacidade. É possível identificar duas abordagens ao planeamento de capacidade (Tabela 3.1): (a) activa ou (b) passiva.

Na primeira, a capacidade dos centros de trabalho poder ser ajustada durante o período de funcionamento do sistema produtivo e na segunda, a capacidade é dada ou está fora

do controlo do mecanismo de CAP. Neste caso a capacidade é controlada e ajustada na fase de planeamento. Os mecanismos com uma estratégia de lançamentos baseada em datas programadas têm um conceito da carga limitado e consideram o planeamento de capacidade passivo.

Na maioria dos mecanismos revistos na secção 3.1 o planeamento da capacidade é passivo. Uma excepção é a abordagem de LUMS, onde o planeamento de capacidade é, segundo os autores, activo.

Tabela 3.1: Caracterização dimensional dos mecanismos de CAP.

		Estratégias de controlo								
		(a) Lançamento imediato (b) Datas programadas (c) Limitação de carga (d) Reposição de existências (e) Híbrido b-c (f) Híbrido b-d	(a) Push (b) Pull	(a) Contínua (b) Discreta (c) Híbrida	(a) Número de trabalhos (b) Quantidade de trabalho	(a) Total do sistema (b) por centro trabalho (CT) (c) por CT crítico (d) por pares de CT	(a) Atemporal (b) Time bucket (c) Probabilística	(a) Balançamento (b) limite superior (c) Limite inferior (d) Limite superior e inferior	(a) Limitada (b) Alargada	(a) Activo (b) Passivo
Dimensões	Mecanismos	Lançamento	Controlo do fluxo materiais	Convenção temporal	Medição da carga	Agregação da carga	Contabilização da carga	Controlo da carga	Visibilidade do programa	Planeamento capacidade
	BSC	(a)	(b)	(a)	---	---	---	---	(a)	(b)
	MRP	(b)	(a)	(b)	---	---	---	---	(a)	(b)
	WR	(c)	(a)	(a)	(b)	(c)	(a)	(c)	(a)	(b)
	TKS	(d)	(b)	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
	CONWIP	(d)	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)	(b)	(a)	(b)
	<i>two-boundary hybrid</i>	(d)	(b)	(a)	(a)	(a) e (b)	(a)	(b)	(a)	(b)
	LUMS	(e)	(a)	(c)	(b)	(b)	(a)	(d)	(a)	(a)
	LOOR	(e)	(a)	(b)	(b)	(b)	(c)	(b)	(a)	(b)
	POLCA	(e)	(b)	(b)	(b)	(d)	(a)	(b)	(a)	(b)
	Synchro-MRP	(f)	(b)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)

3.3 Modelo genérico de WLC

Na literatura, a escolha de um mecanismo de CAP para uma particular situação produtiva, tem sido feita, exclusivamente, pela comparação de mecanismos que usam uma das formas de agregação da carga identificadas na secção 3.2.5. Contudo, não há qualquer razão para limitar a pesquisa apenas a estas formas de agregação da carga. Huang e Kusiak (1998) criticam as abordagens “clássicas” como o TKS, por não considerarem as características específicas dos sistemas produtivos. Dentro deste raciocínio, Gaury *et al.* (2000) demonstraram ser possível configurar diferentes mecanismos a partir de um modelo genérico parametrizável. Contudo, o modelo proposto inclui, essencialmente, mecanismos de reposição de existências; uma perspectiva diferente da de limitação de carga usada nos mecanismos de WLC. Buzacott e Schantikumar (1992, 1993) foram talvez os primeiros a investigar o que se pode designar de sistemas customizados ou personalizados. Os autores desenvolveram um sistema conhecido por *Production Authorization Card*, o qual através da sua apropriada parametrização, pode especializar-se em mecanismos como o MRP, BSC, TKS ou CONWIP.

Nesta secção é introduzido um modelo genérico conceptual parametrizável, capaz de configurar uma variedade de mecanismos de CAP baseados em WLC. O modelo proporciona novas formas de agregação da carga, em particular, permite, ao contrário do que tem acontecido até ao momento, que a selecção dum mecanismo para uma particular situação produtiva, não se restrinja aos mecanismos conhecidos que têm sido propostos na literatura. É possível, através da sua adequada parametrização, chegar a novas abordagens ou mecanismos de WLC.

O modelo proposto permite configurar mecanismos conhecidos que envolvem a limitação de carga, como o LUMS, LOOR, WR ou CONWIP (como implementado em Roderick *et al.*, 1992), entre outros e definir novas formas de agregação da carga na busca de soluções eficientes para o lançamento controlado. Note-se que os mecanismos de limitação de carga, contrariamente aos de reposição de existências, são particularmente adequados a jusante do ponto de entrada de encomendas (PEE) (Hoekstra e Roma, 1992), onde a produção é feita por encomenda.

O PEE é uma área de armazenamento na cadeia de valor do fluxo de materiais, onde um particular produto é ligado com uma particular encomenda, separando a parte da

organização orientada pelo planeamento, da parte da organização orientada pelas encomendas. Este marca o ponto onde a empresa muda de uma produção para stock a montante, para uma produção por encomenda a jusante (Olhager e Wikner, 2000). Assim, a posição do PEE, na cadeia de valor do fluxo de materiais, é preponderante para identificar a parte desta cadeia que deve ser operada segundo os princípios do WLC, i.e. com mecanismos de limitação da carga.

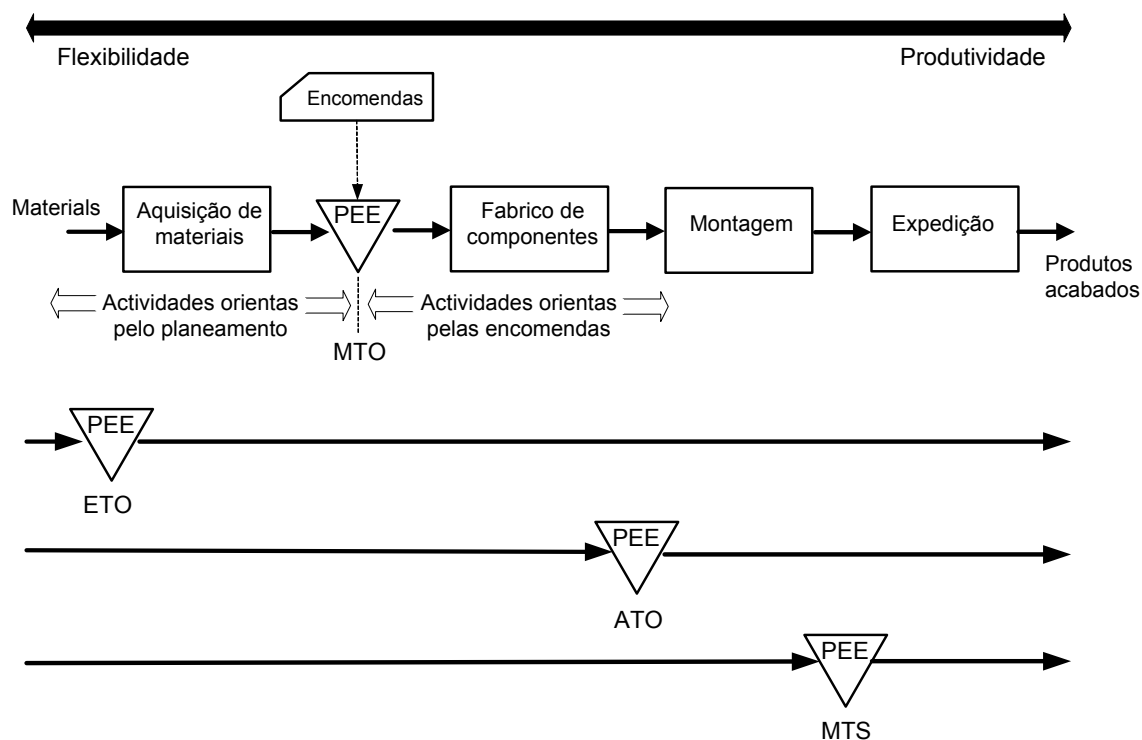


Figura 3.1: Possíveis posições do PEE na cadeia de valor do fluxo de materiais.

Usualmente é possível identificar quatro situações produtivas decorrentes da posição da *pool* na cadeia de valor do fluxo de materiais (Welker *et al.*, 2004), ver figura 3.1: concepção por encomenda (ETO), produção por encomenda (MTO), montagem por encomenda (ATO) e produção para stock (MTS). Uma vez que o WLC é um sistema de planeamento e controlo da produção especificamente concebido para as necessidades particulares das indústrias a operar no sector de produção por encomenda (Stevenson *et al.*, 2005a), o PEE deve encontrar-se posicionado a montante das actividades de expedição, montagem e fabrico.

O modelo proposto envolve o uso de uma *pool*, onde os trabalhos são recolhidos antes de serem lançados para o espaço fabril e o uso de grupos de capacidade, i.e. grupos de

recursos (máquinas, centros de trabalho, células, etc.), para os quais a carga é agregada. Isto é feito através de normas que limitam a carga nesses grupos. Os grupos de capacidade referem-se à mais pequena unidade de produção que necessita de ser controlada durante o lançamento. Assim, os mecanismos podem diferir relativamente aos grupos de capacidade que necessitam de controlar, i.e. para os quais é necessário definir normas de carga.

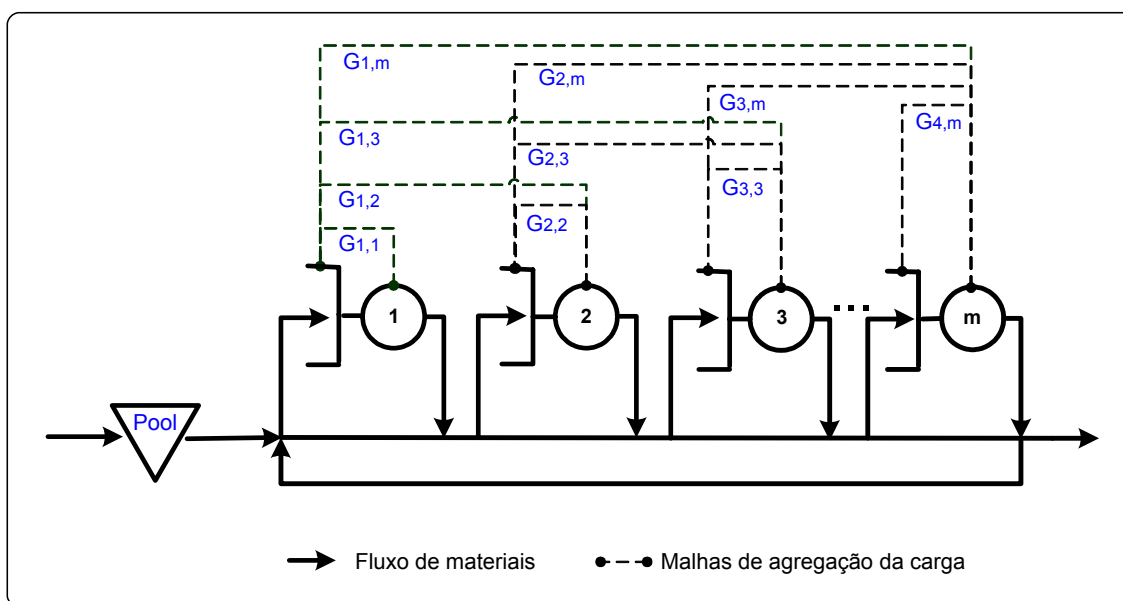


Figura 3.2: Modelo genérico de agregação da carga.

A Figura 3.2 ilustra o modelo proposto para o caso de um sistema produtivo com m centros de trabalhos. No modelo, os grupos de capacidade $G_{a,b}$ são assinalados por malhas que ligam pares, a/b , de centros de trabalho, registando a carga que se encontra nestes centros de trabalho, i.e. em a e em b , e em trânsito entre eles. Por exemplo, no grupo de capacidade $G_{1,2}$ é regista a carga resultante dos trabalhos que se encontram nos centros de trabalho 1, 2, em trânsito de 1 para 2 e de 2 para 1. No caso em que $a = b$, a carga registada refere-se à carga de um único centro de trabalho. Por exemplo, o grupo de capacidade $G_{1,1}$ regista a carga do centro de trabalho 1. Note-se, que a carga registada por grupo de capacidade pode referir-se à carga directa do grupo, à carga agregada ou à carga agregada alargada; ver secção 2.3.

O modelo considera todas as possibilidades de agregação da carga entre centros de trabalho, estabelecendo malhas que ligam cada centro a todos os outros. Para m ($m \geq 2$)

centros de trabalhos, o número total de malhas de controlo, i.e. de grupos de capacidade é igual a $m(m+1)/2$ e o número de estratégias de agregação da carga que é possível definir, decorrente do número de grupos de capacidade que podem, ou não, ser controlados, é igual a $2^{m(m+1)/2}$. Para $m = 4$, por exemplo, o número de possíveis estratégias de agregação da carga é de 1024.

Para cada grupo de capacidade são definidas normas, as quais podem estabelecer um limite superior, $u_{a,b}$, à carga no grupo de capacidade $G_{a,b}$, um limite inferior, $l_{a,b}$, ou ambos.

Na Tabela 3.2, os grupos de capacidade para os quais não são definidos níveis máximos de carga são representados com $u_{a,b} = \infty$ e aqueles para os quais não são definidos níveis mínimos são representados com $l_{a,b} = 0$. Assim, os grupos de capacidade com valores de $u_{a,b} = \infty$ e de $l_{a,b} = 0$ não estabelecem qualquer forma de agregação da carga, não impondo restrições ao lançamento de trabalhos para o espaço fabril. Isto significa que um trabalho pode ser lançado da *pool* para o espaço fabril sem atender à carga que se encontra nestes grupos de capacidade. No modelo proposto considera-se que a existência de materiais é suficiente para activar a produção, independentemente dos níveis de carga nos centros de trabalho, i.e. é usada uma estratégia *push* de controlo do fluxo de materiais.

Considere-se um sistema produtivo com m centros de trabalho. Se o modelo genérico da Figura 3.2 for configurado como a seguir indicado, o mecanismo de WLC obtido é equivalente à abordagem de LUMS:

$$u_{a,b} = \infty \text{ para } \forall a, b \in \{1\dots m, 1\dots m\} \text{ com } a \neq b, \text{ e}$$

$$0 < u_{a,b} \ll \infty \text{ para } \forall a, b \in \{1\dots m, 1\dots m\} \text{ com } a = b, \text{ e simultaneamente}$$

$$l_{a,b} = 0 \text{ para } \forall a, b \in \{1\dots m, 1\dots m\} \text{ com } a \neq b, \text{ e}$$

$$l_{a,b} > 0 \text{ para } \forall a, b \in \{1, \dots, m\} \text{ } a = b.$$

A restrição $0 < u_{a,b} \ll \infty$ é usada para indicar que o valor de $u_{a,b}$ deve ser maior que zero, mas suficientemente pequeno para, em termos práticos, limitar a carga no grupo de capacidade $G_{a,b}$.

Neste caso, o mecanismo procura manter a carga de cada centro de trabalho, entre um mínimo dado por $l_{a,b}$ e um máximo dado por $u_{a,b}$. A carga dos restantes grupos de capacidade do modelo genérico, não é restringida. Note-se que no âmbito da abordagem de LUMS, a carga de cada centro de trabalho é referente à carga agregada, i.e. à soma da carga directa com a carga a montante.

De forma similar, se o modelo genérico for configurado com os dados:

$$0 < u_{1,m} \ll \infty, \text{ e}$$

$$u_{a,b} = \infty \text{ para } \forall a, b \in \{1 \dots m, 1 \dots m\} \text{ com } a \neq 1 \text{ e } b \neq m, \text{ e simultaneamente}$$

$$l_{a,b} = 0 \text{ para } \forall a, b \in \{1 \dots m, 1 \dots m\}.$$

um mecanismo equivalente ao CONWIP, no que se refere à agregação e ao controlo da carga, é representado. Neste caso, a carga global do sistema, i.e. do grupo de capacidade $G_{1,m}$, é agregada e limitada por um valor máximo, o qual é estabelecido pela norma $u_{1,m}$. Nos restantes grupos de capacidade do modelo genérico a carga não é restringida.

Na Tabela 3.2, encontram-se exemplos de parametrização do modelo genérico da Figura 3.2, com os mecanismos WR, CONWIP, LUMS e LOOR, para o exemplo de um sistema produtivo com 4 centros de trabalho.

Tabela 3.2: Parametrização do modelo genérico com diferentes mecanismos de WLC.

Mecanismo	Normas	Grupos de capacidade ($G_{a,b}$)									
		1,1	1,2	1,3	1,4	2,2	2,3	2,4	3,3	3,4	4,4
WR	$u_{a,b}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	$l_{a,b}$	$l_{1,1}^*$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CONWIP	$u_{a,b}$	∞	∞	∞	$u_{1,4}$	∞	∞	∞	∞	∞	∞
	$l_{a,b}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LUMS	$u_{a,b}$	$u_{1,1}$	∞	∞	∞	$u_{2,2}$	∞	∞	$u_{3,3}$	∞	$u_{4,4}$
	$l_{a,b}$	$l_{1,1}$	0	0	0	$l_{2,2}$	0	0	$l_{3,3}$	0	$l_{4,4}$
LOOR	$u_{a,b}$	$u_{1,1}$	∞	∞	∞	$u_{2,2}$	∞	∞	$u_{3,3}$	∞	$u_{4,4}$
	$l_{a,b}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*norma para o centro de trabalho crítico

Através da adequada parametrização do modelo é possível chegar a novas formas de agregação da carga, além das conhecidas e implementadas em abordagens “clássicas” de controlo da actividade de produção, como as apresentadas na Tabela 3.2. Um

exemplo simples encontra-se ilustrado na Figura 3.3, onde a carga é agregada em apenas dois grupos de capacidade de uma *flow shop* com 4 centros de trabalho: $G_{1,1}$ e $G_{2,3}$.

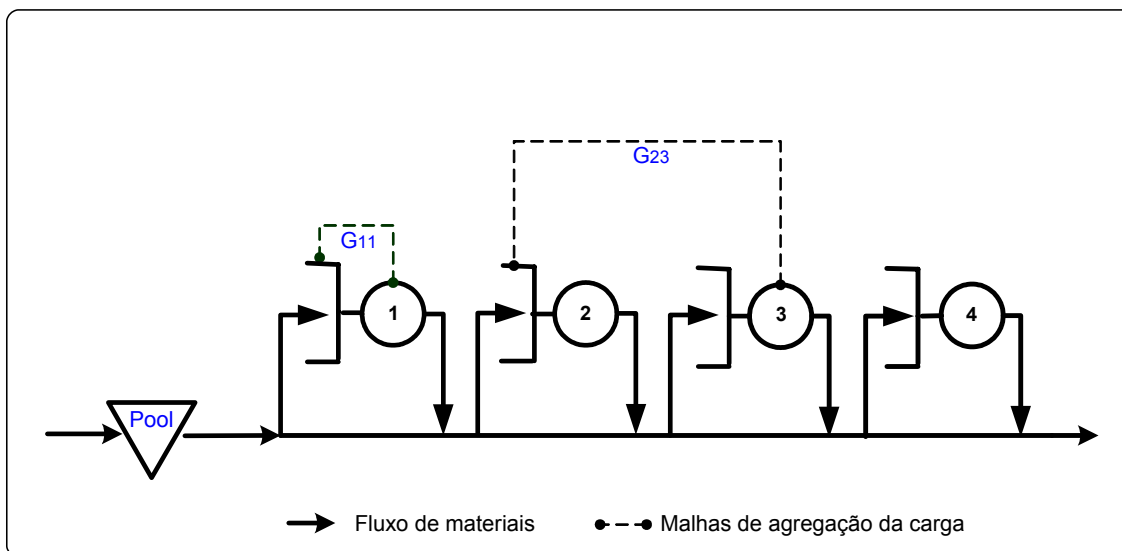


Figura 3.3: Mecanismo resultante da agregação da carga em dois grupos de capacidade.

O modelo pode, também, ser usado para encontrar as estratégias de agregação e de controlo da carga, que optimizam um determinado critério de desempenho, numa determinada situação produtiva. Optimizando os valores das normas $u_{a,b}$ e $l_{a,b}$ será possível encontrar os grupos de capacidade que devem ser controlados durante o lançamento. Uma maior limitação do modelo reside, contudo, na sua complexidade. Para um sistema produtivo com, por exemplo, 4 centros de trabalho, a optimização do modelo, admitindo que o valor de $l_{a,b}$ e de $u_{a,b}$ é escolhido de $\{0,1,\dots,4\}$ e de $\{10,\dots,18,\infty\}$, respectivamente, envolve um espaço de procura de $5^{10} \times 10^{10}$ estratégias de agregação da carga. No caso geral em que os valores de $l_{a,b}$ e de $u_{a,b}$ são escolhidos, respectivamente, de entre x e z possíveis valores, o espaço de procura é de $x^{m(m+1)/2} \cdot z^{m(m+1)/2}$ estratégias de agregação de carga.

3.4 Conclusões sumárias

Neste capítulo é avançada uma classificação para os mecanismos de CAP baseada em nove dimensões. Estas encontram-se relacionadas com as principais propriedades e características dos mecanismos. A classificação amplia classificações anteriores,

propondo uma nova dimensão, nomeadamente o controlo do fluxo de materiais e explorando dimensões previamente apresentadas. Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo genérico capaz de configurar uma variedade considerável de mecanismos de CAP baseados em WLC pela sua conveniente parametrização. O modelo foca, essencialmente, a estratégia de agregação da carga. A complexidade observada leva, contudo, a concluir que não será razoável procurar obter soluções óptimas para sistemas produtivos de dimensões realistas, onde m , o número de centros de trabalho, pode ser bastante elevado. Uma abordagem mais prática consiste em estudar as principais dimensões dos mecanismos de CAP baseados em WLC, estabelecendo regras e linhas de orientação para a selecção das estratégias de controlo a adoptar, em contextos ou situações produtivas específicas. Esta abordagem é seguida no capítulo 4.

Capítulo 4

Comportamento dos Mecanismos de WLC

Este capítulo analisa e estuda o comportamento dos mecanismos de Controlo da Actividade de Produção (CAP) baseados em Workload Control (WLC), com vista a responder às seguintes questões, centrais a este trabalho de investigação:

1. Como é que as estratégias de controlo e os parâmetros de lançamento afectam o desempenho dos mecanismos de WLC?
2. Quais são as dimensões e estratégias de controlo que mais contribuem para tornar os mecanismos de WLC robustos a perturbações no sistema produtivo?
3. Que influência pode ter a configuração do sistema produtivo na selecção do mecanismo de WLC a usar?

A análise é levada a cabo através de um estudo experimental usando a simulação computacional.

O desempenho dos mecanismos é avaliado através do estudo das dimensões principais que os constituem, em vez de se compararem como um todo, como é usual. Estas descrevem as características e propriedades fundamentais dos mecanismos de CAP, ver secção 3.2. Espera-se, desta forma, alcançar uma melhor compreensão do potencial real de cada mecanismo. Em particular, pretende-se estabelecer linhas de orientação para a selecção das estratégias de controlo a usar em dimensões como as do controlo da carga e da contabilização da carga ao longo do tempo. Note-se que é relativamente a estas

duas dimensões que os três conceitos principais de WLC (ver capítulo 3) particularmente diferem.

Procura-se, ainda, perceber o impacto de alguns dos parâmetros de lançamento que são necessários especificar dentro da abordagem WLC, no desempenho dos mecanismos. Os parâmetros considerados são o período de libertação, o limite temporal e as normas de carga. O conhecimento detalhado da influência destes parâmetros é necessário para a sua correcta aplicação e para a introdução de futuras melhorias nos mecanismos de WLC.

A robustez dos mecanismos a perturbações no sistema produtivo é particularmente relevante. Adoptar uma abordagem robusta ao controlo da actividade de produção é mais seguro. Assim, mesmo que as condições de operação não sejam completamente claras, ou se estas se alterarem ao longo do tempo, o desempenho dos mecanismos deteriorar-se-á menos. Desta forma, no estudo do comportamento dos mecanismos de WLC, a robustez a perturbações de factores tais como o nível de carga no sistema, a distribuição dos tempos de processamento e a distribuição do intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema, é avaliada através de um plano de experimentação baseado na metodologia de Taguchi (Taguchi e Clausing, 1990; Ross, 1988).

Uma vez que os mecanismos lidam de forma diferente com o fluxo de materiais ou de trabalho, tal como salientado no capítulo 3, será de esperar que o comportamento destes possa ser influenciado pela configuração do sistema produtivo. Esta influência é também analisada neste capítulo, considerando diferentes configurações produtivas. Em particular, é estudado o desempenho dos mecanismos na presença e na ausência de um fluxo de trabalho directo, i.e. em que a sequência e o tipo de operações realizadas é similar em todos os trabalhos.

Os resultados deste estudo deverão contribuir para a selecção de mecanismos de WLC apropriados em situações práticas.

O capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: na secção 4.1 é efectuada uma revisão dos estudos de simulação que têm procedido à comparação de mecanismos de WLC, discutindo os resultados relatados; na secção 4.2 é introduzida a metodologia de investigação usada para responder às questões acima formuladas e na secção 4.3 analisam-se e discutem-se os resultados obtidos.

4.1. Trabalho anterior

Têm sido efectuados diversos estudos em mecanismos de CAP baseados em WLC. No capítulo 3 foram identificados vários mecanismos que têm vindo a ser propostos na literatura. A maioria dos estudos que se podem encontrar nesta área, centram-se na comparação do desempenho proporcionado por um conjunto limitado de mecanismos, num determinado ambiente produtivo, identificando vantagens e limitações de cada um.

A estrutura usual de investigação é baseada na simulação de sistemas produtivos do tipo *job shop*, envolvendo, no geral, o estudo de diferentes mecanismos, os quais são frequentemente combinados com diversas regras de prioridade ao nível do despacho e/ou métodos de definição da data de entrega, usando o lançamento imediato como *benchmark*. É possível, ainda, encontrar estudos que versam a interacção entre o lançamento e o nível de carga no sistema. Embora a estrutura de investigação seja metodologicamente bastante similar na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, os resultados experimentais obtidos, tal como assinalado por Salegna e Park (1996), raramente estão de acordo no que se refere ao desempenho dos mecanismos.

Ragatz e Mabert (1988) apresentam um dos principais estudos nesta área. Os autores testaram quatro mecanismos em combinação com quatro regras de prioridade ao nível do despacho e três níveis de folga nas datas de entrega. Os resultados mostraram que a *Modified Infinite Loading* (MIL) possui um desempenho superior a um conjunto de outros mecanismos mais complexos testados. A MIL é uma técnica de lançamento bastante simples que considera apenas alguma informação sobre o estado das filas de espera do espaço fabril e sobre as características dos trabalhos, nomeadamente a data de entrega, o número de operações e o tempo de processamento, mas que ignora a capacidade existente, i.e. considera-a infinita. Os autores sugerem, ainda, que os trabalhos que são lançados para o espaço fabril demasiado cedo competirão pelos recursos com os trabalhos mais urgentes.

Melnyk e Ragatz (1989) mostraram que embora o lançamento controlado reduza o tempo que os trabalhos permanecem no espaço fabril, i.e. o tempo de percurso, o tempo total que estes permanecem no sistema, i.e. o tempo no sistema, nem sempre é reduzido, comparativamente a uma situação produtiva onde os trabalhos são lançados de imediato. Segundo os autores, o lançamento controlado faz com que o tempo de espera em filas no espaço fabril seja transferido para a *pool*, onde os trabalhos aguardam pelo seu

lançamento e como tal, o desempenho em termos do tempo no sistema, não é melhorado. Neste estudo foram considerados dois mecanismos de CAP em combinação com quatro regras de prioridade e quatro níveis de folga nas datas de entrega.

A interacção entre o lançamento e o despacho tem sido objecto de grande controvérsia. Baker (1984), por exemplo, sugere que a escolha da regra de prioridade a usar ao nível do despacho é mais importante para o desempenho do sistema produtivo, do que o lançamento controlado de trabalhos para o espaço fabril. Refere, ainda, que as melhorias que possam ser alcançadas com os mecanismos de CAP são apenas pontuais. Contudo, autores como Lingayat *et al.* (1995) apresentam uma opinião contrária, considerando a escolha do mecanismo de CAP mais importante. Wein (1988) e Bechte (1994) referem que à medida que o lançamento controlado se torna mais eficiente, o impacto do despacho no desempenho do sistema produtivo, tende a diminuir. De acordo com esta perspectiva, na presença de um mecanismo eficiente, apenas uma regra simples, tal como a regra FIFO, é necessária ao nível do despacho (Bechte, 1994, Kingsman, 2000).

Os estudos que têm olhado para a interacção entre o lançamento e a entrada de trabalhos no sistema são mais escassos, mas incluem os trabalhos de Melnyk *et al.* (1991), Zapfel e Missbauer (1993), Hendry e Wong (1994), Salegna e Park (1996) e Philipoom e Fry (1992).

Melnyk *et al.* (1991) mostraram que a eficiência do lançamento pode ser melhorada, quando associado a um nível hierárquico mais elevado de planeamento, que alisa a carga que é libertada para a *pool*, mantendo-a entre um mínimo e um máximo predefinidos. Segundo os autores, este nível mais elevado de planeamento e o lançamento complementam-se, na medida em que o primeiro reduz o tempo que os trabalhos passam no sistema e o segundo reduz o WIP no espaço fabril. Concluíram, ainda, que controlando ambos os níveis, se reduz a necessidade de regras de prioridade complexas ao nível do despacho. Contudo, os resultados de simulação obtidos sugerem que enquanto o atraso médio é reduzido, a percentagem de trabalhos em atraso é menor se o nível mais elevado de planeamento for usado isoladamente. Estes resultados foram posteriormente confirmados por Zapfel e Missbauer (1993) e Hendry e Wong (1994).

Hendry e Wong (1994), por exemplo, estudaram o desempenho da abordagem de LUMS, um conceito de WLC que envolve ambos os níveis: a entrada de trabalhos no sistema e o lançamento. O mecanismo tem, ainda, a possibilidade de fazer ajustes na

capacidade. Em comparação com um cenário de lançamento imediato, a abordagem de LUMS apresentou resultados superiores para todas as medidas de desempenho consideradas, à exceção da percentagem de trabalhos em atraso. Segundo os autores, fica por responder à questão: em que medida os mecanismos de CAP conseguem reduzir a percentagem de trabalhos em atraso?

Salegna e Park (1996) estenderam o trabalho de Melnyk *et al.* (1991), mostrando que a percentagem de trabalhos em atraso pode ser reduzida, se for possível ajustar a carga ao nível da entrada de trabalhos, antecipando a libertação de trabalhos para a *pool* nos períodos de menor procura. Os autores comparam no seu estudo um mecanismo similar ao CONWIP com o lançamento imediato, num *job shop* com recursos críticos explícitos ou estrangulamentos, usando quatro técnicas relativamente simples de alisamento da carga libertada para a *pool* e três regras de prioridade ao nível do despacho.

Num estudo levado a cabo por Philipoom e Fry (1992) a restrição de que todas as encomendas ou trabalhos colocados pelos clientes têm de ser aceites, foi relaxada. Os resultados obtidos revelaram que rejeitando uma pequena proporção de trabalhos, que iriam sobrecarregar o sistema produtivo, o desempenho deste pode ser substancialmente melhorado. Os autores concluíram, ainda, que uma metodologia de lançamento baseada no controlo da carga lançada para os recursos críticos, proporciona melhores resultados, do que uma metodologia baseada no controlo da carga total no sistema.

Ahmed e Fisher (1992) e Filipoom *et al.* (1993) estudaram a relação do lançamento com a entrada de trabalhos no sistema e o despacho. Os autores encontraram interações significativas entre os mecanismos considerados ao nível do lançamento, as regras de prioridade consideradas ao nível do despacho e os métodos de definição das datas de entrega considerados ao nível da entrada. Ahmed e Fisher (1992), por exemplo, testaram três dos quatro mecanismos propostos por Ragatz e Mabert (1988), em combinação com quatro métodos de definição da data de entrega e quatro regras de prioridade ao nível do despacho. Os autores não encontraram uma combinação de políticas que desempenhasse melhor que todas as outras, em todos os níveis de utilização e mesmo dentro de um mesmo nível de utilização, relativamente às diversas medidas de desempenho consideradas.

Roderick *et al.* (1992) comparam o desempenho de quatro mecanismos de CAP em diferentes ambientes produtivos, resultantes da combinação de diferentes condições de

operação do sistema produtivo. Dois dos mecanismos considerados, o CONWIP e o Sarvation Avoidance (SA), usam abordagens diferentes à agregação da carga lançada. O primeiro controla a carga total no sistema, enquanto o segundo controla a carga libertada para o recurso crítico. O CONWIP mostrou ser o mecanismo mais robusto, com um desempenho superior em termos de WIP, tempo no sistema e percentagem de trabalhos em atraso, nos diferentes ambientes produtivos considerados. Estes resultados discordam obviamente dos resultados de Philipoom e Fry (1992).

Lingayat *et al.* (1995) compararam o desempenho de um mecanismo por eles, proposto, com o CONWIP, em conjunto com três regras de prioridade ao nível do despacho, assumido o lançamento imediato como *benchmark*. Os resultados mostraram que o desempenho dos mecanismos depende do nível de carga no espaço fabril. Com um nível de carga baixo ou moderado, os mecanismos testados conduziram a um incremento do tempo no sistema, comparativamente com uma situação de lançamento imediato. Com um nível de carga elevado, uma redução do tempo no sistema foi verificada no mecanismo por eles proposto.

Malhotra *et al.* (1994) compararam a técnica *Modified Infinite Loading* com o mecanismo *Path Based Bottleneck*, um mecanismo de limitação de carga similar ao DBR previamente estudado em Philipoom e Fry (1992) e Philipoom *et al.* (1993), num ambiente produtivo que combina trabalhos de prioridade normal com trabalhos de prioridade elevada (ou vital). Os autores concluíram que é preferível usar mecanismos de limitação de carga, em que os trabalhos são lançados para o espaço fabril com base no estado deste, do que mecanismos simples que apenas levem em consideração as características do trabalho a ser libertado, tal como previamente tinha sido sugerido por Ragatz e Mabert (1988). Contudo, os resultados apresentados são em si contraditórios. Se por um lado, o *Path Based Bottleneck* melhora o atraso e a percentagem de trabalhos em atraso dos trabalhos de prioridade normal, relativamente ao lançamento imediato, o que é consistente com o trabalho anterior de Philipoom *et al.* (1993), por outro, piora o valor RMS (*root mean square*) do atraso. Este critério penaliza particularmente os trabalhos muito atrasados, i.e. com um valor de atraso elevado.

Sabuncuoglu e Karapinar (1999) compararam pela primeira vez mecanismos que usam uma convenção temporal discreta, i.e. em que o lançamento de trabalho para o espaço fabril é feito periodicamente, com mecanismos que usam uma convenção temporal

contínua. Os mecanismos foram comparados sob várias condições experimentais resultantes da combinação de duas regras de prioridade, dois níveis de utilização do sistema e dois níveis de folga nas datas de entrega, relativamente a diversas medidas de desempenho. Os autores concluíram que os mecanismos de convenção contínua, apresentam um desempenho superior para critérios como o tempo de percurso e o atraso, enquanto os mecanismos de convenção discreta ou periódica, apresentam melhor desempenho quando o critério usado é o desvio absoluto médio do *lateness*. Este último é medido pela diferença entre a data de entrega e a data de conclusão devida. Concluíram, ainda, que o tempo que os trabalhos passam no sistema pode ser reduzido, i.e. os potenciais benefícios dos mecanismos de CAP podem ser alcançados, se o congestionamento no espaço fabril for adequadamente modelado. Os autores não observaram interacções significativas entre o lançamento e o despacho.

Breithaupt *et al.* (2002) produziram uma revisão dos pontos fortes e fracos dos mecanismos de CAP baseados em WLC, alguns referentes ao conceito de limitação de carga, outros mais específicos do mecanismo LOOR. Previamente, Land e Gaalman (1996, 1998) compararam e avaliaram conceitos de WLC, identificando razões para o pobre desempenho, relatado em diversos estudos de simulação (v.g. Baker, 1984 e Melnyk e Ragatz, 1989), relativamente a critérios como o atraso e a percentagem de trabalhos em atraso.

Como a análise dos resultados de investigação acima sumariados sugerem, nenhum dos mecanismos propostos na literatura, pode ser visto como o melhor para efectuar o lançamento e controlo do fluxo de materiais. Algumas razões podem ser apontadas para justificar tal facto:

- O desempenho dos mecanismos depende das condições de controlo da produção, tais como regras de prioridade ao nível do despacho, folga das datas de entrega, utilização do sistema, mistura de produtos, etc..
- As condições de operação do sistema produtivo, i.e. tipo de configuração, variabilidade dos tempos de processamento, folga das datas de entrega (quando estabelecidas externamente, ou seja pelo cliente), disponibilidade das máquinas e equipamento, entre outros, podem ter um impacto importante no desempenho global do sistema.

- Os mecanismos têm sido comparados e avaliados como um todo, usando diferentes condições de experimentação, nomeadamente, de controlo da produção e de operação do sistema produtivo. Contudo, como observado no capítulo 3 os mecanismos de CAP são constituídos por nove dimensões básicas, as quais descrevem as suas características e propriedades fundamentais.

De facto, os resultados obtidos relativos ao desempenho dos mecanismos de CAP, podem ser bastante diferentes quando perturbações no sistema produtivo são tomadas em consideração (Cigolini *et al.*, 1998), ou quando diferentes configurações do sistema produtivo, particularmente no que se refere ao tipo de fluxo entre centros de trabalho, são analisadas (Oosterman *et al.* 2000, Portioli, 2002).

Uma melhor compreensão do potencial real de cada mecanismo pode ser alcançado, procurado perceber a influência das diferentes estratégias de controlo (Cigolini e Portioli, 2002) e parâmetros de lançamento (Land, 2006) no seu desempenho. Assim, a metodologia de investigação seguida neste estudo baseia-se nas seguintes hipóteses:

- A escolha do mecanismo mais adequado para uma particular situação produtiva, pode ser efectuada comparando os mecanismos não como um todo, mas através da identificação dos melhores níveis (ou estratégias) de controlo a adoptar em cada uma das dimensões que os constituem.
- A análise comparativa dos mecanismos deve ser realizada em ambientes produtivos dinâmicos, i.e. tomando em consideração as perturbações no sistema produtivo.
- A influência que uma particular estratégia de controlo ou parâmetro de lançamento pode ter no desempenho dos mecanismos, deve ser analisada à luz de possíveis interacções com outras estratégias e parâmetros de lançamento, e não isoladamente.

4.2 Metodologia de investigação

No sentido de responder às questões formuladas no início deste capítulo, foi conduzido um estudo de simulação usando o software ARENA (Kelton *et al.*, 2001). No anexo A.1 encontra-se a lista de código SIMAN de uma versão representativa dos modelos de simulação desenvolvidos e usados na experimentação. As medidas de desempenho relatadas representam a média de 90 replicações IID (Independentes e Identicamente Distribuídas) realizadas ao longo de 27600 unidades de tempo. Para anular quaisquer

efeitos transientes foi usado um período inicial de aquecimento de 9600 unidades de tempo. Isto significa que foram recolhidos dados durante 18000 unidades de tempo.

4.2.1 Modelo

A influência das estratégias de controlo e dos parâmetros de lançamento no desempenho dos mecanismos de WLC, foi avaliada no contexto de um sistema produtivo sem recursos críticos explícitos ou estrangulamentos. As condições de operação e de controlo da produção do sistema produtivo modelado encontram-se sumariadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. O modelo de experimentação foi mantido tão simples quanto possível, de forma a evitar interações inesperadas com as estratégias de controlo e parâmetros de lançamento considerados.

Tabela 4.1: Condições de operação do sistema produtivo

Característica	Valor de experimentação
Centros de trabalho	Seis, com um máquina cada
Operações por trabalho	Distribuição Discreta (1,6)
Tempos de preparação	Independentes da sequência de processamento
Folga das datas de entrega	Distribuição Uniforme (50.8,60.8)*
Tempos processamento	Distribuição 2-Erlang (1)

* Valores usados na configuração *job shop*

Tabela 4.2: Condições de controlo da produção

Característica	Valor de experimentação
Normas de carga	Testadas a vários níveis de restrição
Regra de prioridade	FIFO
Utilização planeada do sistema	90%

O sistema produtivo é constituído por seis centros de trabalho, possuindo cada um, uma única máquina que permite processar diversos trabalhos. Cada máquina não pode processar mais do que um trabalho em simultâneo. Apesar de existirem estudos que incluem um maior número de máquinas, vários autores defendem que a dimensão do sistema produtivo, não tem um impacto significativo no desempenho deste (v.g. Baker e Dzielinki 1960 e Moore e Wilson, 1967). A capacidade dos centros de trabalho é mantida invariável durante todo o tempo de simulação.

De forma a determinar a influência do tipo de fluxo de trabalho, no desempenho dos mecanismos de WLC, foram modeladas três configurações produtivas: *job shop*, *flow shop* pura e *flow shop* geral.

A configuração *job shop* tem sido usada na maioria dos estudos de simulação de mecanismos de CAP baseados em WLC. Nesta configuração cada trabalho requer processamento numa ou mais máquinas (ou centros de trabalho), num roteiro de fabrico que pode variar de trabalho para trabalho. Neste caso, cada máquina tem uma probabilidade igual de aparecer em cada operação de cada trabalho (Conway *et al.*, 1967). Isto significa que os trabalhos podem começar e acabar o seu processamento em qualquer máquina. De com com Baker (1974) é possível ter um qualquer número de operações por trabalho.

Na configuração *flow shop* todos os trabalhos seguem essencialmente o mesmo roteiro ao longo das várias máquinas (Conway *et al.*, 1967). Numa *flow shop* pura cada trabalho pode ser tratado como tendo exactamente k operações, uma em cada máquina num roteiro de fabrico igual para todos os trabalhos. Numa *flow shop* geral não é requerido que cada trabalho possua uma operação em cada máquina, nem que todos os trabalhos iniciem, ou terminem, o seu processamento numa máquina específica. Os trabalhos podem visitar um subconjunto de máquinas, desde que o movimento entre qualquer combinação de duas máquinas ocorra sempre no mesmo sentido. Enns (1995) considera que os *job shops reais se* aproximam da configuração *flow shop* geral. De facto é vulgar encontrar na maioria dos *job shops* reais, máquinas ou centros de trabalho que se posicionam de acordo com um fluxo predominante de produção, configurando um arranjo produtivo similar ou aproximado da *flow shop* geral.

Na configuração *job shop* modelada, os roteiros são gerados aleatoriamente a partir de um conjunto de 20 tipos de roteiros disponíveis, cada um com igual probabilidade de ocorrência (Tabela 4.3). Os roteiros foram estabelecidos definindo em primeiro lugar o número de operações, a partir de uma distribuição uniforme no intervalo [1, 6] e de seguida o centro de trabalho onde cada uma das operações é realizada. Cada operação requer um centro de trabalho específico para ser realizada, não sendo permitida a recirculação de trabalhos. O número médio de operações por roteiro, resultante do número de operações em cada um dos 20 roteiros, é de 3,6.

Tabela 4.3: Matriz de roteiros de fabrico.

Tipo de roteiro	Número da Operação					
	1	2	3	4	5	6
1	2	4	6	1	5	3
2	1	3	5			
3	2	3	5	4		
4	5					
5	4	2	5	6	1	
6	2	5	4	6	1	3
7	1	3	2	6		
8	2	6				
9	2	5	4			
10	3	1	5	4	6	2
11	6	2	3			
12	2	6	1	3	2	
13	2	3	6			
14	4	1	2	5	3	
15	1					
16	4	3	6	5	1	
17	4					
18	3	4	6	5		
19	4	1	6			
20	4	1				

Na configuração *flow shop* geral modelada, os roteiros são gerados de forma similar à descrita para configuração *job shop*, i.e. a partir do conjunto de 20 tipos de roteiros indicados na Tabela 4.3. Contudo, os trabalhos visitam os centros de trabalho por ordem crescente do número do centro de trabalho. Isto significa que o centro de trabalho 1 é sempre o primeiro a ser visitado, enquanto que o centro de trabalho 6 é sempre o último, no caso de fazerem parte do roteiro de fabrico de um particular trabalho.

Na *flow shop* pura modelada, os trabalhos visitam todos os centros de trabalho (de 1 a 6), fazendo-o por ordem crescente do número do centro de trabalho.

A entrada de trabalhos no sistema constitui a primeira oportunidade para influenciar o fluxo de trabalho. Como referido na secção anterior, Melnyk *et al.* (1991) investigou esta influência, tendo sugerido que o alisamento da carga libertada para a *pool* pode aliviar a tarefa de lançamento. Contudo, como o estudo aqui realizado coloca a ênfase no lançamento, as exigências colocadas aos mecanismos de CAP baseados em WLC não são restringidas. Assim, considera-se que o intervalo entre chegadas consecutivas de trabalhos ao sistema segue uma distribuição Exponencial, o que permite testar os mecanismos em circunstâncias de maior variabilidade, resultantes da presença de cargas não alisadas no sistema.

O nível de carga no sistema é ajustado por alteração do intervalo entre chegadas. No sentido de assegurar uma utilização média global planeada de 90%, o apropriado intervalo entre chegadas foi estabelecido através de algumas simulações piloto, admitindo uma situação de lançamento imediato. Este intervalo entre chegadas foi posteriormente usado nas experiências de simulação realizadas. A utilização considerada é consistente com o observado nos *job shops* reais. No artigo de Kanet e Hayya (1982), os autores concluíram que a utilização média dos *job shops* varia entre 80% e 90%.

À chegada ao sistema, é atribuído a cada trabalho uma data de entrega. Estas são estabelecidas externamente, i.e. pelo cliente e modeladas como variáveis aleatórias, de forma a resultar numa percentagem de trabalhos em atraso que varia entre 5% e 10%, numa situação de lançamento imediato. Por exemplo, isto é alcançado na configuração *job shop* usando uma distribuição uniforme entre 50,8 e 60,8 unidades de tempo para a folga das datas de entrega.

Após aceitação do trabalho, este é colocado numa *pool* de capacidade infinita, onde aguarda pelo seu lançamento para o espaço fabril. Cada trabalho é considerado para lançamento de acordo com uma data planeada de libertação, r_i , a qual é determinada com base em *lead times* de produção:

$$r_i = d_i - \sum_{j \in S_i} LT_j \quad (4.1)$$

onde LT_j é o *lead time* no centro de trabalho j , d_i é a data de entrega prometida do trabalho i e S_i é o conjunto de centros de trabalho no roteiro de fabrico de i . Os *lead times* nos centros de trabalho foram estabelecidos através de algumas simulações piloto, usando o lançamento imediato e um intervalo entre chegadas conforme acima referido, i.e. que resulte numa utilização média global de 90%.

É assegurado que o trabalho considerado para lançamento, é apenas lançado se respeitar as normas de carga estabelecidas para cada grupo de capacidade, i.e. centro de trabalho. A decisão de lançamento é tomada periodicamente, no início de cada período de libertação. Se o trabalho for lançado para o espaço fabril, a carga de cada centro de trabalho é actualizada em conformidade. Se não for, o trabalho é mantido na *pool*, onde aguarda pelo próximo período de libertação. O próximo trabalho na *pool* é então

considerado para lançamento e o procedimento repete-se até que não existam mais trabalhos para considerar.

A decisão de lançamento é baseada em dois aspectos, na urgência dos trabalhos e na influência que estes poderão ter no estado do espaço fabril. Este último aspecto é determinado, comparando as cargas em cada grupo de capacidade, com as normas especificadas para esses mesmos grupos de capacidade. Foram adoptadas normas com valores iguais para todos os grupos de capacidade ou centros de trabalho. Estas normas foram posteriormente testadas a vários níveis de restrição, começando com um valor muito elevado, o qual foi progressivamente reduzido de forma a limitar a carga no espaço fabril.

O despacho constitui a última oportunidade de influenciar o fluxo de trabalhos. Como base no referido anteriormente, em que autores como Kingsman (2000) sugerem que o despacho possui uma influência menor, a disciplina FIFO foi usada em todos os centros de trabalho do espaço fabril.

Os tempos de processamento foram considerados idênticos para todas as operações em todas as máquinas, seguindo uma distribuição 2-Erlang de média 1 unidade de tempo. De acordo com Oosterman *et al.* (2000) a distribuição 2-Erlang aproxima bem as observações efectuadas em *job shops* reais.

Nas diversas máquinas, os tempos de preparação são considerados independentes da sequência de processamento dos trabalhos e assumidos como parte do tempo de processamento. A possibilidade de avaria das máquinas não é explicitamente considerada, i.e. é assumido que as máquinas são fiáveis.

4.2.2 Medidas de desempenho

Foram registadas, para análise, cinco medidas de desempenho. Estas medidas são essencialmente de dois tipos: relativas aos *lead times* e relativas às datas de entrega.

As medidas de desempenho relativas aos *lead times* incluem o tempo de percurso e o tempo no sistema, i.e. o tempo que o trabalho passa na *pool* mais o tempo que passa no espaço fabril. No âmbito deste trabalho procura-se, essencialmente, perceber a influência das estratégias de controlo e prâmetros de lançamento nestas duas medidas.

As medidas de desempenho relativas às datas de entrega incluem o atraso, o desvio padrão do *lateness* e a percentagem de trabalhos em atraso. Estas estatísticas têm sido estudadas extensivamente na literatura e permitem avaliar a capacidade do sistema para cumprir com as datas de entrega prometidas.

O *lateness*, L_i , é medido calculando a diferença entre a data de conclusão da encomenda (ou trabalho) e a data de entrega prometida, $C_i - d_i$. Avalia-se desta forma, se existe ou não, algum desvio em relação à data de entrega prometida.

O atraso, T_i , mede os desvios positivos do *lateness*, $\text{Max}(0, L_i)$, identificando, portanto, trabalhos que concluem o seu processamento após a data de entrega, i.e. $C_i > d_i$.

A percentagem de trabalhos em atraso refere-se à percentagem de encomendas, ou trabalhos, colocados pelo cliente, que concluem o seu processamento após a data de entrega.

Neste estudo não se está interessado nos valores absolutos destas medidas de desempenho, mas nas diferenças de desempenho entre as diferentes estratégias de controlo consideradas.

Para cada medida de desempenho analisada, foram construídos intervalos de confiança de 95% com base na distribuição *t* student (ver por exemplo, Law e Kelton 2000). O teste de Kolmorov Smirnov à normalidade dos dados foi levado a cabo, não se tendo encontrado evidência estatística para rejeitar a hipótese nula a um nível de confiança de 95% (valor $p < 0,05$).

4.2.3 Plano de experimentação

O número de factores controláveis estudado, i.e. variáveis independentes, foi limitado a quatro, nomeadamente: a contabilização da carga ao longo do tempo; o controlo da carga; o período de libertação; e o limite temporal. Contudo, a sensibilidade dos resultados a diferentes níveis das normas de carga foi também analisada. A contabilização da carga ao longo do tempo e o controlo da carga referem-se a dimensões dos mecanismos de WLC. O período de libertação, o limite temporal e as normas de carga, referem-se a parâmetros de lançamento que vulgarmente são necessários especificar dentro da abordagem WLC, para suportar a decisão de lançamento. Estudos

anteriores mostraram que estes parâmetros podem ter uma importante influência no desempenho dos mecanismos de WLC (ver por exemplo Land, 2006).

O *período de libertação* (RP), o qual determina o intervalo entre lançamentos, está associado à convenção temporal discreta. A escolha do período de libertação é geralmente resultante da prática industrial, podendo o lançamento ocorrer, por exemplo uma vez por turno, uma vez por dia ou uma vez por semana. Mas será esta uma boa prática?

Note-se que na definição do período de libertação é essencial considerar o risco dos centros de trabalho pararem por falta de material. Ao reduzir o período de libertação, será de esperar uma redução do tempo que os trabalhos aguardam na *pool* para serem lançados para o espaço fabril e eventualmente, do tempo no sistema. Isto poderá significar um melhor desempenho do mecanismo de WLC, no que se refere aos prazos de entrega. Contudo, será igualmente de esperar uma redução nas possibilidades de escolha de trabalhos que respeitem as normas de carga, em resultado de uma diminuição do número de trabalhos na *pool* e portanto, que respeitem a sequência planeada de lançamento. Nesta situação, o desempenho do mecanismo de WLC, no que se refere à entrega atempada poderá deteriorar-se.

Neste trabalho, assumindo uma convenção temporal discreta, a influência do período de libertação é estudada. Este factor é testado a dois níveis: 8 e 4 unidades de tempo.

O *limite temporal* (TL) está associado à data planeada de libertação, r_i . Este factor é testado a dois níveis: infinito e o dobro do período de libertação (2RP).

Um limite temporal infinito significa que quando o momento de libertação ou lançamento, determinado pelo período de libertação, é atingindo, todos os trabalhos na *pool*, independentemente da sua data planeada de libertação, são considerados para lançamento. Um limite temporal finito significa que apenas os trabalhos com uma data planeada de libertação dentro do limite temporal, portanto urgentes, são considerados para lançamento. Como tal, um limite temporal pequeno deve melhorar as medidas de desempenho relacionadas com a entrega atempada. Contudo, deve igualmente reduzir as possibilidades de escolha de trabalhos que respeitem as normas de carga, por considerar apenas uma parte dos trabalhos que se encontram na *pool*. De forma a evitar a demora

dos trabalhos na *pool*, o limite temporal deve no mínimo ser igual ao período de libertação, i.e. $TL \geq RP$.

O factor contabilização da carga ao longo do tempo é testado a dois níveis, correspondentes a duas estratégias: atemporal e probabilística.

Na estratégia atemporal, quando um trabalho é lançado para o espaço fabril considera-se que este adiciona instantaneamente carga a todos os grupos de capacidade por onde passa, na base do tempo de processamento desse trabalho. O método da carga ajustada (Oosterman *et al.*, 2000) é usado para contabilizar a carga em cada grupo de capacidade. Este método permite a adopção de normas de carga com valores idênticos para cada grupo de capacidade, independentemente da variabilidade dos roteiros dos trabalhos. Mais especificamente, é assumido que um trabalho i contribui $p_{i,s}/o_{i,s}$ para a carga agregada de um particular centro de trabalho s . Onde, $p_{i,s}$ é o tempo de processamento de i em s e $o_{i,s}$ representa a posição ordenada do centro de trabalho no roteiro de fabrico de i . O método é explicado em detalhe no capítulo 2.

Na estratégia probabilística é usado o método de conversão desenvolvido por Bechte (1988). O método transforma toda a carga a montante, de um particular centro de trabalho, em carga directa estimada, funcionando como um factor de depreciação. Este é explicado em detalhe no capítulo 2.

A dimensão *controlo da carga* influencia as decisões de lançamento com base na estratégia adoptada. Neste estudo, o factor controlo da carga é testado a três níveis, correspondentes a três estratégias: limitação da carga por um limite inferior; limitação da carga por um limite superior e balanceamento da carga.

Na primeira estratégia, o lançamento procura evitar a paragem dos centros de trabalho por falta de material, assegurando que a carga de cada grupo de capacidade se encontra acima de um limite inferior, especificado por uma norma. Isto significa que o lançamento de um trabalho será autorizado se, em pelo menos um dos grupos de capacidade do roteiro de fabrico desse trabalho, a carga contabilizada se encontrar abaixo do limite inferior especificado.

Na segunda estratégia, o lançamento procura limitar a carga no espaço fabril, assegurando que em cada um dos grupos de capacidade não é excedido um limite superior especificado por uma norma. Isto significa que um trabalho não será lançado se,

em resultado desse lançamento, a carga contabilizada ultrapassar o limite superior de pelo menos um dos grupos de capacidade no roteiro de fabrico do trabalho.

Land e Gaalman (1998) concluíram que normas rígidas poderão resultar numa deterioração do desempenho dos mecanismos de limitação de carga. Se a carga não se encontrar bem balanceada entre centros de trabalho, as normas impostas aos centros de trabalho mais utilizados, poderão bloquear o lançamento de novos trabalhos para o espaço fabril. Nesta situação, relaxar as normas de carga, poderá facilitar o lançamento de trabalhos que correntemente não se enquadrem nas normas de carga. Assim, o lançamento de tais trabalhos não conduzirá necessariamente a níveis mais elevados de trabalho em curso de fabrico (WIP), melhorando o balanceamento e, portanto, o desempenho dos mecanismos.

A terceira estratégia testada é baseada neste pressuposto de relaxação das normas de carga. Nesta estratégia, o lançamento em vez de procurar limitar a carga no espaço fabril, procura balancear a carga entre centros de trabalho. Neste caso, o lançamento de um trabalho é autorizado, se em resultado desse lançamento: (1) a carga contabilizada num ou mais grupos de capacidade do roteiro de fabrico do trabalho não exceder um limite superior especificado; ou (2) excedendo o limite superior de carga, contribua para um melhor balanceamento, da carga contabilizada, entre grupos de capacidade. Restringe-se, contudo, a carga no espaço fabril assegurando que o limite de carga, em cada grupo de capacidade, não é excedido em mais de 20%. Foram realizadas algumas simulações piloto para diferentes percentagens. Os resultados obtidos mostraram que 20% é um valor razoável. Para avaliar o balanceamento da carga foi empregue um dos índices de balanceamento (BI) usados em Garetti *et al.* (1990):

$$BI = \frac{\sum_j^m F_{i,j}}{\max_j \{F_{i,j}\} m} \quad (4.2)$$

onde $F_{i,j}$ representa a carga contabilizada no centro de trabalho j resultante do lançamento do trabalho i para o espaço fabril e m o número de centros de trabalho. A melhor situação de balanceamento é obtida para BI igual a 1.

Para cada uma das estratégias de controlo, os valores apropriados das normas de carga necessitam de ser determinados. Em particular, pretende-se comparar a influência das

estratégias de controlo no desempenho dos mecanismos de WLC a diferentes níveis de restrição das normas de carga. Contudo, uma vez que são utilizadas abordagens diferentes à contabilização da carga, o nível de restrição das normas não é directamente comparável. Para o fazer é usado o tempo de percurso. Segundo Oosterman *et al.* (2000) duas normas são igualmente restritivas se resultarem no mesmo valor do tempo de percurso.

4.3 Análise e discussão dos resultados

Os resultados experimentais obtidos através do modelo de simulação descrito na secção anterior encontram-se subdivididos em duas partes. A secção 4.3.1 apresenta os resultados obtidos sob a influência do fluxo de trabalho aleatório, proporcionado pela configuração *job shop*. Esta secção apresenta, ainda, os resultados de uma análise ao desempenho dos mecanismos de WLC, quando perturbações no sistema produtivo, nomeadamente nas condições de operação, são tomadas em consideração. A secção 4.3.2 apresenta os resultados obtidos sob a influência do fluxo de trabalho directo, proporcionado pelas configurações, *flow shop* pura e *flow shop* geral.

Quando a discussão dos resultados menciona diferenças significantes entre as estratégias de controlo, isto é baseado no resultado de *paired t-tests* com um nível de confiança de 95%.

4.3.1 Influência de um fluxo de trabalho aleatório

A Figura 4.1 mostra a relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso, para as três estratégias de controlo da carga em estudo, i.e. controlo da carga por um limite superior, controlo da carga por um limite inferior e balanceamento da carga, quando combinadas com as duas estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo, i.e. atemporal e probabilística.

Estratégias de controlo com um desempenho superior resultam num menor tempo no sistema para um dado tempo de percurso, i.e. possuem uma curva característica puxada para baixo e para a esquerda. Um ponto na curva é o resultado de simular uma estratégia

a um nível específico da norma de carga. Assim, as curvas obtidas representam a influência de alterações aos valores da norma de carga.

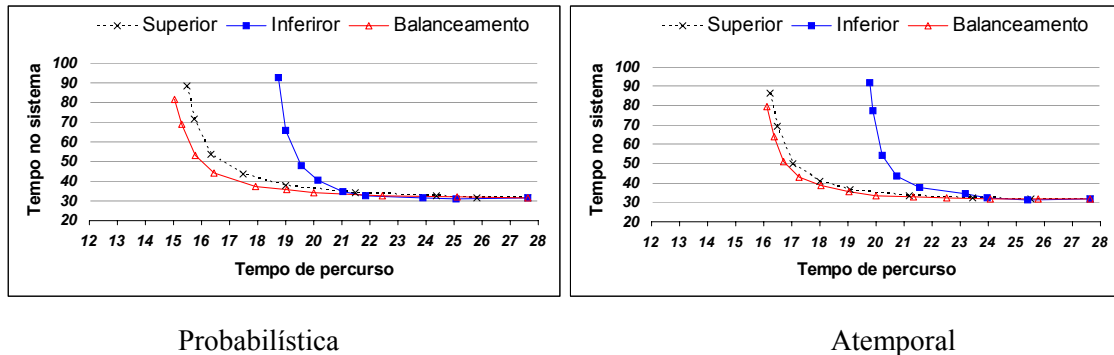


Figura 4.1: Comportamento das estratégias na configuração *job shop*.

Como se pode observar na figura, as curvas convergem no valor mais elevado do tempo de percurso. Isto é o resultado de normas de carga que não restringem a carga no espaço fabril, i.e. não impõem um limite superior e/ou um limite inferior à carga. Está-se, assim, perante uma situação de lançamento periódico não restritivo. Como seria de esperar, todas as estratégias apresentam os mesmos valores de tempo de percurso e de tempo no sistema, i.e. 27,6 e 31,6 unidades de tempo, respectivamente, quando o lançamento não é restringido por normas de carga.

À medida que as normas se tornam mais restritivas, menos trabalhos são lançados para o espaço fabril, passando a aguardar mais tempo na *pool*. Assim, em virtude do tempo de espera ser transferido das filas do espaço fabril para a *pool*, o tempo de percurso é reduzido. Para normas ainda mais restritivas, i.e. para tempos de percurso menores o tempo no sistema começa a aumentar. Abaixo de um determinado *ponto crítico* o desempenho das estratégias de controlo deteriora-se significativamente, i.e. o tempo no sistema aumenta substancialmente sem qualquer redução significativa no tempo de percurso. O crescente tempo no sistema para normas restritivas significa que a carga na *pool* aumenta mais, do que diminui a carga no espaço fabril. Kenet (1988) já tinha concluído que o tempo no sistema é deteriorado em resultado da introdução de tempo morto nos centros de trabalho, devido a normas de carga mais restritivas.

Os resultados obtidos mostram que o *ponto crítico* das estratégias de controlo da carga por um limite superior e de balanceamento da carga, ocorre para um tempo de percurso

próximo de 19 unidades de tempo. Este comportamento verifica-se em ambas as estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo. Na estratégia de controlo da carga por um limite inferior, o *ponto crítico* é atingido mais cedo, i.e. para valores mais elevados do tempo de percurso, mostrando ter o pior desempenho das três estratégias de controlo da carga estudadas.

Os resultados parecem confirmar as expectativas no que refere à relaxação das normas de carga na estratégia de balanceamento. De facto, comparando com as estratégias do limite superior e do limite inferior, para cada nível de restrição das normas de carga, esta estratégia apresenta valores idênticos ou inferiores para o tempo no sistema.

Na Tabela 4.4, encontram-se os resultados de simulação obtidos para cada uma das medidas de desempenho descritas na secção 4.2.2. Esta tabela proporciona informação acerca das diferentes estratégias de controlo da carga e de contabilização da carga ao longo do tempo, quando é usado um período de libertação de 8 unidades de tempo e um limite temporal infinito. Comparações entre estratégias de cada uma das dimensões foram desenvolvidas recolhendo dados no mesmo ponto da curva característica, i.e. para o mesmo valor de tempo de percurso. Os dados foram recolhidos para um tempo de percurso de 19 unidades de tempo, i.e. próximo do *ponto crítico* das estratégias de controlo da carga por um limite superior e de balanceamento da carga.

Tabela 4.4: Resultados globais das estratégias de controlo

Medidas de desempenho	Probabilística			Atemporal	
	Limite Inferior	Limite Superior	Balanceamento	Limite Superior	Balanceamento
Tempo de percurso	19,012±4,60	19,014±0,08	19,028±0,12	19,072±0,10	19,056±0,11
Tempo no sistema	65,641±0,13	37,979±0,93	35,549±0,65	36,622±0,80	35,350±0,57*
Percentagem de trabalhos em atraso	46,467±3,37	18,487±1,05	14,669±0,69	16,364±1,13	14,194 ±0,71*
Atraso	20,621±3,67	3,553±0,56	2,711±0,27	2,436±0,36	2,218±0,24*
Desvio padrão do <i>lateness</i>	34,418±1,97	22,283±0,95	21,028±0,52	19,860±0,61	19,701±0,51*

* Melhores valores

Na tabela, não se encontram disponíveis valores para um tempo de percurso de 19 unidades de tempo na situação em que o controlo da carga é feito por um limite inferior e a estratégia contabilização da carga ao longo do tempo é atemporal. A razão prende-se com o facto de não ser possível obter dados através da simulação, como a Figura 4.1 claramente mostra.

A Tabela 4.5 resume as diferenças de desempenho entre as estratégias de controlo.

Tabela 4.5: Diferenças de desempenho entre as estratégias de controlo

Medidas de desempenho	Probabilística		Atemporal
	Balanceamento vs. Limite Inferior	Balanceamento vs. Limite Superior	Balanceamento vs. Limite Superior
Tempo no sistema	-45,8%	-6,4%	-3,5%
Percentagem de trabalhos em atraso	-68,4%	-20,6%	-15,5%
Atraso	-86,9%	-23,7%	-8,9%
Desvio padrão do <i>lateness</i>	-38,9%	-5,6%	-0,8%

Da análise dos resultados resultam quatro importantes conclusões.

Primeiro, é possível operar o sistema produtivo com menos WIP e tempos de percurso mais curtos, antes do tempo no sistema começar a aumentar substancialmente. Relativamente a uma situação de lançamento imediato, em que o tempo de percurso observado é de 26 unidades de tempo, o tempo de percurso de 19 unidades de tempo obtido pelas estratégias de balanceamento e controlo da carga por um limite superior, representa uma redução de 26,9%.

Segundo, a estratégia de balanceamento da carga é a que apresenta um melhor desempenho, independentemente da estratégia de contabilização da carga ao longo do tempo ser atemporal ou probabilística. A estratégia de balanceamento apresenta diferenças significativas para praticamente todas as medidas de desempenho avaliadas, em relação às restantes estratégias de controlo da carga. A estratégia de balanceamento reduz a percentagem de trabalhos em atraso em 15,5 % na abordagem atemporal e em 20,6% na abordagem probabilística, relativamente à estratégia de controlo da carga por um limite superior. Reduz também o tempo no sistema em 3,5% na estratégia atemporal e em 6,4% na estratégia probabilística, relativamente à mesma estratégia de controlo da carga. Reduz ainda o atraso e o desvio padrão do *lateness* na abordagem probabilística

em 23,7% e 5,6%, respectivamente. *Paired t-tests* com um nível de confiança de 95% mostraram, contudo, que na abordagem atemporal não existem diferenças com significado estatístico entre as estratégias de balanceamento e de controlo da carga por um limite superior no que se refere ao atraso e ao desvio padrão do *lateness*.

Terceiro, o desempenho das estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo não parece ser independente da estratégia de controlo da carga usada, relativamente ao tempo no sistema. Quando o controlo da carga é feito por um limite superior, ou por balanceamento, as estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo possuem um desempenho similar em termos do tempo no sistema, i.e. não existem diferenças com significado estatístico; contudo, quando o controlo da carga é feito por um limite inferior, a estratégia probabilística possui o melhor desempenho superior ao da estratégia atemporal (ver Figura 4.1 e Tabela 4.4).

Estudos similares conduzidos por Cigolini *et al.* (1998) e por Oosterman *et al.* (2000). Cigolini *et al.* (1998) observaram resultados ligeiramente melhores da estratégia probabilística em relação à estratégia atemporal. A contabilização da carga na abordagem atemporal não foi, contudo, realizada através do método da carga ajustada aqui adoptado. Oosterman *et al.* (2000) concluíram que o mecanismo LOOR, o qual usa a estratégia probabilística, possui um desempenho superior à abordagem de LUMS, a qual usa a estratégia atemporal. Contudo, no estudo destes autores, os mecanismos foram comparados como um todo, o que não permite isolar o efeito destas estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo, do efeito de outras estratégias e dimensões. Ou seja, não permite afirmar que as diferenças verificadas se devem apenas à influência das estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo.

Quarto, a estratégia de controlo da carga por um limite inferior não parece proporcionar uma forma eficiente de controlo, num ambiente produtivo caracterizado por um fluxo de trabalho aleatório.

Tal como se viu na secção 4.2.3, por um lado, usando uma estratégia de controlo da carga por um limite superior, um trabalho será lançado para o espaço fabril se, como resultado desse lançamento, a carga contabilizada em todos os centros de trabalho do roteiro de fabrico desse trabalho, for inferior ao limite especificado pela norma. Por outro, usando uma estratégia de controlo da carga por um limite inferior, um trabalho não será lançado, se a carga contabilizada em todos os centros de trabalho do roteiro de

fabrico desse trabalho, for superior ao limite especificado pela norma (se pelo menos um for inferior então o trabalho é lançado).

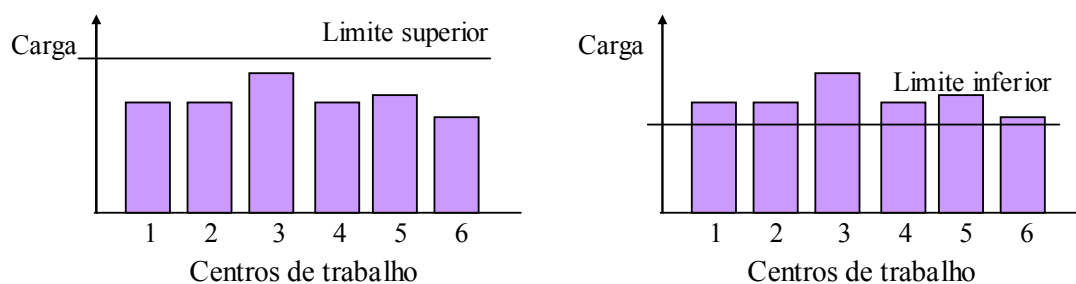


Figura 4.2: Controlo da carga lançada por limite superior vs. limite inferior.

Assim, para a mesma carga no espaço fabril, em que a carga contabilizada em todos os centros de trabalho, está abaixo do limite superior e simultaneamente acima do limite inferior, como exemplificado na Figura 4.2, o lançamento poderá ou não ser autorizado na estratégia de controlo de carga por um limite superior, dependendo da carga se manter ou não abaixo do limite em todos os centros de trabalho, mas nunca o será na estratégia de controlo de carga por um limite inferior. Desta forma, é de esperar que a carga que é mantida na *pool*, tenha tendência a ser maior no caso da estratégia de controlo da carga por um limite inferior. Isto é de facto confirmado pela observação da Figura 4.3. A figura ilustra a evolução da carga na *pool* durante o tempo de simulação, 27600 unidades de tempo, quando o controlo da carga é efectuado por um limite superior e quando é efectuado por um limite inferior. Usando a estratégia probabilística, foram recolhidos dados de simulação para um tempo de percurso de 19 unidades de tempo, i.e. no mesmo ponto da curva característica. Os resultados obtidos mostram que para o mesmo tempo de percurso, a carga na *pool* é mais elevada durante praticamente todo o tempo de simulação, quando é usada a estratégia de controlo da carga por um limite inferior. Estes resultados parecem confirmar a situação ilustrada na Figura 4.2, relativa ao comportamento das duas estratégias de controlo da carga. Resultados similares são obtidos quando é usada a estratégia atemporal. Tal comportamento da carga significa que na estratégia de controlo da carga por um limite inferior, os trabalhos permanecem na *pool* durante mais tempo, agravando o tempo no sistema para um mesmo tempo de percurso.

O desempenho da estratégia de balanceamento da carga pode ser explicada por razões idênticas, uma vez que é baseada na estratégia de controlo da carga por um limite superior, relaxando as normas de carga sempre que o índice de balanceamento pode ser melhorado em resultado do lançamento do trabalho.

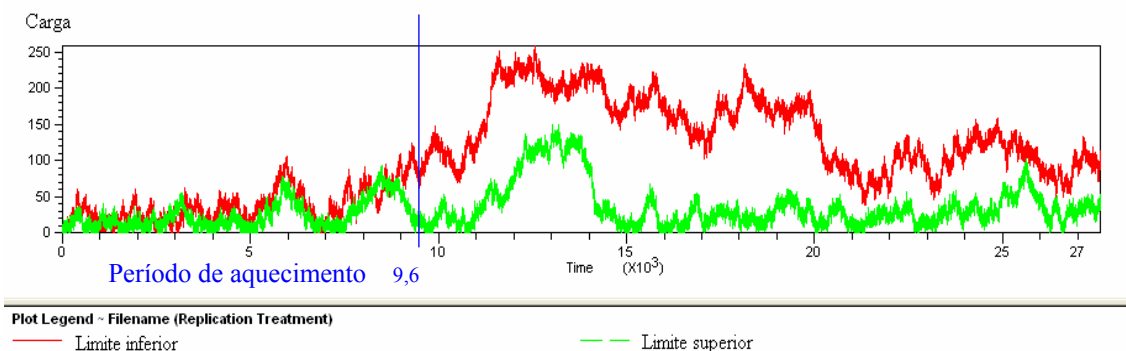
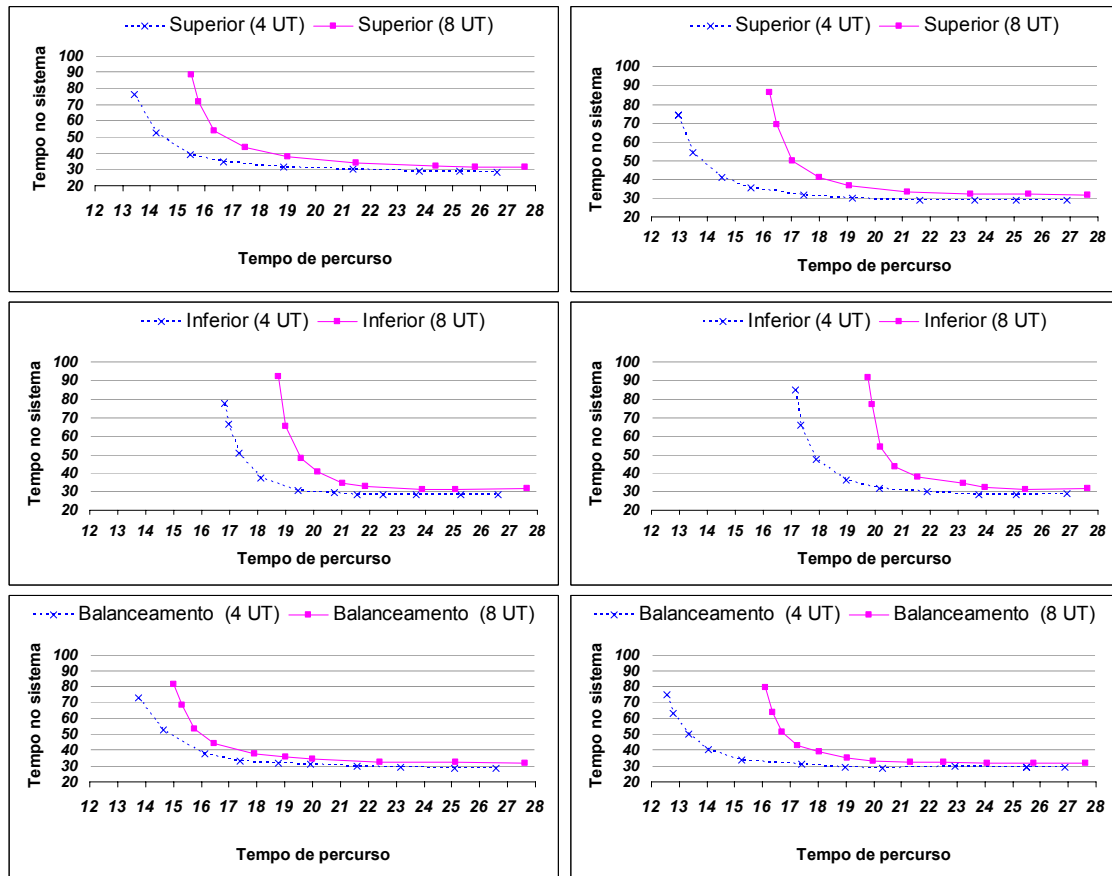


Figura 4.3: Evolução da carga na *pool* para as duas estratégias de limitação da carga.

A Figura 4.4 mostra o comportamento das estratégias de controlo, ao longo do tempo, sob a influência do período de libertação. Da observação da figura conclui-se que um período de libertação mais longo resulta, num tempo no sistema mais elevado numa situação de lançamento periódico não restritivo. Isto deve-se ao facto de os trabalhos necessitarem de esperar mais tempo pelo início do próximo período de libertação, para serem libertados. Nesta situação, em que as normas não restringem a carga no espaço fabril, alongar o período de libertação significa, também, mais trabalhos a serem libertados para o espaço fabril no início de cada período. Assim, um período de libertação mais longo resulta, também, em tempos de percurso mais longos.

A figura mostra, ainda, que o desempenho das estratégias de controlo da carga é melhor quando o período de libertação é de 4 unidades de tempo (4UT), independentemente da estratégia de contabilização da carga ser probabilística ou atemporal. Em particular, uma importante redução do tempo no sistema é obtida na situação em que o período de libertação é de 4 unidades de tempo, a estratégia de contabilização da carga ao longo do tempo é atemporal e o controlo da carga é feito por balanceamento. O ponto crítico da curva resultante desta combinação de estratégias ocorre para um tempo de percurso próximo de 15 unidades de tempo. Isto representa uma redução do tempo de percurso em 42,3%, relativamente a uma situação de lançamento imediato. Nesta situação, o tempo de percurso é de 26 unidades de tempo.



Probabilística

Atemporal

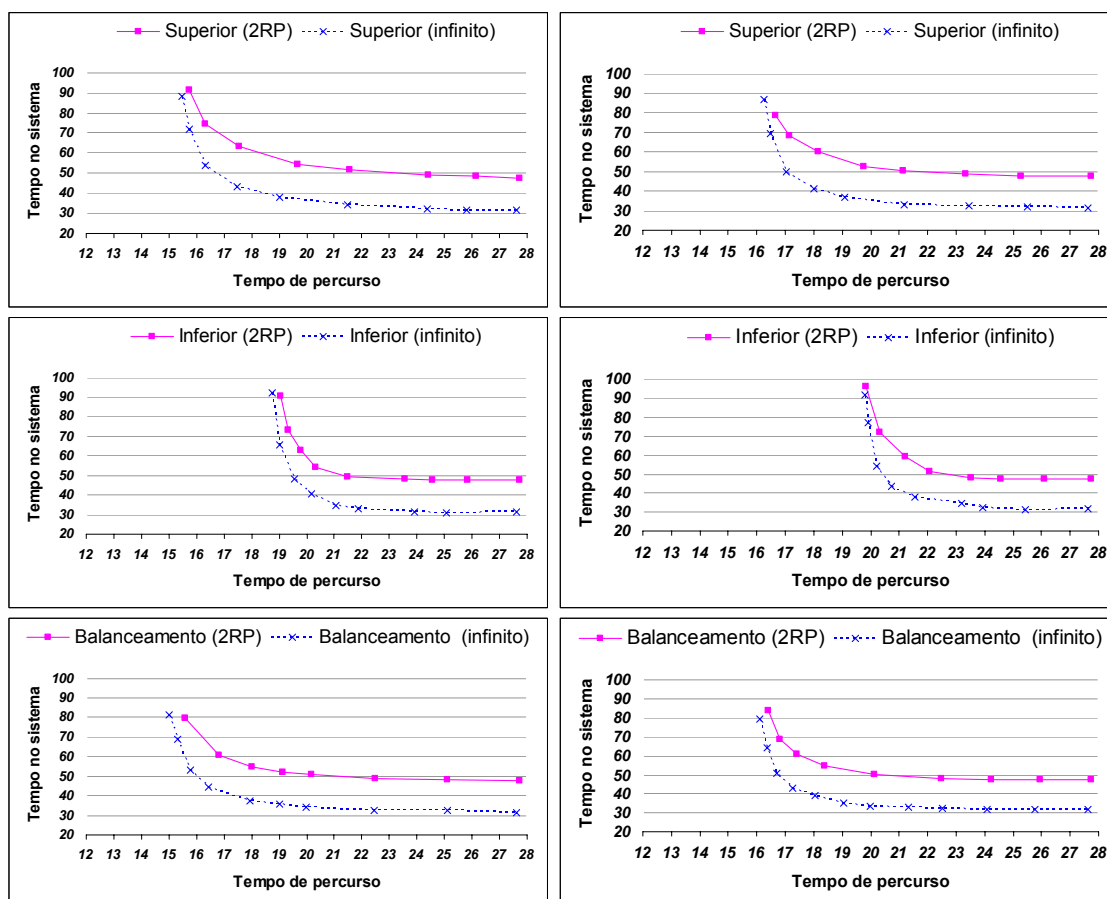
Figura 4.4: Comportamento das estratégias sob influência do período de libertação.

A Figure 4.5 mostra o comportamento das estratégias de controlo sob a influência do limite temporal. Como se pode observar, o comportamento das estratégias consideradas deteriora-se na presença de um limite temporal finito de 16 unidades de tempo, i.e. igual ao dobro do período de libertação ($2RP$), adoptado nas experiências realizadas.

Note-se que um limite temporal finito restringe o lançamento de trabalhos para o espaço fabril, permitindo apenas o lançamento daqueles que são urgentes, i.e. cuja data planeada de libertação cai dentro do limite temporal. Isto reduz as possibilidades de balanceamento, i.e. reduz as oportunidades de seleccionar trabalhos da *pool* que se enquadrem nas normas de carga. Em resultado, o tempo que os trabalhos permanecem na *pool* e consequentemente no sistema, aumenta.

Uma constatação clara da Figura 4.5 é que as curvas tendem a convergir à medida que as normas de carga se tornam cada vez mais restritivas. De facto, normas mais restritivas resultam numa redução do número de trabalhos que podem ser lançados,

diminuindo a influência do limite temporal no desempenho dos mecanismos. No entanto, há uma diferenciação nítida de comportamento para valores mais elevados das normas, verificando-se, um melhor comportamento da curva respeitante à situação em que não há limite temporal, i.e. o limite temporal é infinito.



Probabilística

Atemporal

Figura 4.5: Comportamento das estratégias sob influência do limite temporal.

4.3.1.1 Robustez a perturbações no sistema produtivo

Nesta secção pretende-se identificar os factores controláveis e seus níveis (valores tomados pelos factores) que tornam os mecanismos de WLC robustos, i.e. menos sensíveis a perturbações de factores ambientais ou de ruído. Os factores controláveis estudados incluem a contabilização da carga ao longo do tempo, o controlo da carga, o período de libertação e o limite temporal. Os factores ambientais ou de ruído incluem a

carga no sistema, a distribuição dos tempos de processamento e a distribuição do intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema.

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 encontram-se indicados os factores controláveis e os factores de ruído estudados, assim como a atribuição dos correspondentes níveis.

Tabela 4.6: Factores controláveis

Factor	Designação	Nível 1	Nível 2
A	Contabilização da carga	Atemporal	Probabilística
B	Controlo da carga	Limite superior	Balanceamento
C	Período de libertação	8 UT	4 UT
D	Limite temporal	Infinito	Dobro do período libertação

UT – unidades de tempo

Tabela 4.7: Factores de ruído

Factor	Designação	Nível 1	Nível 2
X	Carga no sistema	Elevada	Moderada
Y	Distribuição tempos processamento	2-Erlang	Exponencial
Z	Distribuição intervalo entre chegadas	Exponencial	Constante

Os factores de ruído considerados neste estudo representam algumas das mais comuns fontes de variabilidade em ambientes industriais, susceptíveis de influenciar o desempenho dos mecanismos de WLC.

O intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema está relacionado com o fluxo de trabalho do sistema de planeamento para a *pool*. Os dois tipos extremos de sistemas de planeamento são: (1) um sistema de planeamento que não alisa a carga libertada para a *pool*; e (2) um sistema de planeamento que mantém a carga libertada entre um mínimo e um máximo predefinidos. Na primeira situação a carga não é controlada, o que pode ser indicativo de sistema de planeamento ineficiente, ou mesmo da ausência de um sistema de planeamento. Na segunda situação a carga é controlada.

Não é objectivo modelar explicitamente a operação do sistema de planeamento, mas apenas representar o seu *output* relacionado com a distribuição do intervalo entre chegadas de trabalho à *pool*. Para representar a situação de cargas controladas é considerado um intervalo constante entre chegadas de trabalhos à *pool* e para

representar a situação de cargas não controladas, i.e. de elevada variabilidade, é usada uma distribuição exponencial do intervalo entre chegadas. O valor médio do intervalo entre chegadas é idêntico em ambas as situações, sendo determinado conforme definido na secção 4.2.1.

O factor nível de carga no sistema é testado a dois níveis, elevado e moderado, por alteração do intervalo entre chegadas ao sistema, resultando em níveis de utilização de 90% e 80%, respectivamente. A utilização está relacionada com a carga, ou trabalhos, que se encontram no espaço fabril e pode ser medida como uma percentagem do tempo de trabalho que os recursos se encontram ocupados.

Os tempos de processamento de operações industriais representam uma importante fonte de variabilidade dentro dos sistemas de produção. Em linhas balanceadas, por exemplo, tende a reduzir fortemente a sua eficiência. Esta variabilidade reflecte, por uma lado, a natural influência do trabalho humano e por outro, perturbações diversas que podem ocorrer no espaço fabril, tais como a indisponibilidade das máquinas e dos equipamentos requeridos, variações no tamanho dos lotes, no abastecimento de materiais e nos tempos de preparação (set-ups), entre outras. Combatendo estas fontes de variabilidade é possível alterar a distribuição dos tempos de processamento.

O factor distribuição dos tempos de processamento é testado a dois níveis. Para representar uma situação de elevada variabilidade é usada a distribuição exponencial, enquanto que para representar uma situação de menor variabilidade, é usada a distribuição 2-Erlang mencionada na secção 4.2.1. O tempo médio de processamento é idêntico para as duas distribuições, sendo igual 1 unidade de tempo.

Por este plano experimental requerer a realização de simulações adicionais, esta análise foi realizada apenas para um subconjunto de níveis dos factores controláveis, considerados relevantes, por terem proporcionado os melhores resultados, como se apresentou na secção anterior. Para além da influência dos factores controláveis, a influência das suas interacções no desempenho dos mecanismos de WLC, foi também estudada.

A abordagem usada ao planeamento das experiências é baseada no método de Taguchi (Taguchi e Konishi, 1987; Ross, 1988). O método consiste num plano de experiências, baseado em matrizes ortogonais, que têm como objectivo planejar a aquisição controlada

de dados, executar as experiências e analisar os dados, de maneira a obter informação sobre o comportamento do sistema em estudo. O método de Taguchi considera explicitamente o efeito de fontes de variações (factores de ruído) nos factores controláveis, permitindo identificar os níveis destes factores, que tornam o sistema menos sensível, i.e. robusto às fontes de variação. O tratamento dos resultados das experiências é feito com base na análise da variância (ANOVA).

Tabela 4.8: Matriz Ortogonal $L_{16}(2^{15})$ de Taguchi

No Teste	No coluna - Factores ou Interações														
	1 A	2 B	3 AB	4 C	5 AC	6 BC	7 ABC	8 D	9 AD	10 BD	11 ABD	12 CD	13 ACD	14 BCD	15 ABCD
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabela 4.9: Matriz Ortogonal $L_4(2^3)$ de Taguchi

Ambiente industrial	Factores de Ruído		
	X	Y	Z
1	1	1	1
2	2	2	1
3	2	1	2
4	1	2	2

O plano experimental usado consiste numa matriz ortogonal interior com a notação $L_{16}(2^{15})$, para os factores controláveis e numa matriz ortogonal exterior com a notação L_4

(2^3), para os factores de ruído ou ambientais. A matriz interior possui 16 linhas, correspondentes ao número de testes a realizar e 15 colunas a dois níveis, às quais os factores A, B, C e D e as interacções entre eles, tais como entre A e B - representada por AB - foram atribuídos (Tabela 4.8). Diz-se que existe interacção quando o efeito de um factor não é o mesmo a diferentes níveis do outro factor. O efeito refere-se à alteração na resposta devido à alteração do nível do factor. A matriz exterior possui 4 linhas, correspondentes a diferentes contextos ou ambientes industriais e três colunas a dois níveis, às quais foram atribuídos os factores de ruído, conforme indicado na Tabela 4.9. Cada teste é definido através de uma combinação de níveis dos vários factores em estudo. Para cada linha da matriz interior, a qual especifica uma condição de teste relativamente aos factores controláveis, a matriz exterior especifica quatro condições de teste, relativamente aos factores de ruído. Isto significa que o plano experimental é constituído por 64 testes independentes, para os quais é necessário realizar um número idêntico de simulações.

Uma das características fundamentais do método de Taguchi é o uso de uma medida de robustez designada razão sinal ruído (S/R), a qual é medida em decibéis (dB). Para respostas do tipo *menor-é-melhor* a razão S/R (η) é calculada de acordo com a equação (Ross, 1988):

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w y_i^2 \right) \quad (4.3)$$

onde y_i é a resposta resultante da i -ésima combinação dos factores de ruído, w é número total de combinações dos factores de ruído para cada combinação dos factores controláveis no plano experimental; neste caso $w=4$. Esta razão S/R é sensível a alterações tanto na média das respostas, como na dispersão em torno da média.

A resposta em estudo é o tempo no sistema, sendo, portanto, do tipo *menor-é-melhor*. Para cada combinação dos factores controláveis e dos factores de ruído, dada pelo plano de experimentação, é determinado o correspondente valor do tempo no sistema, y_i , através do modelo de simulação, sendo a razão S/R (η) calculada por aplicação da equação 4.3 (Tabela 4.10). Todos os testes, para os factores controláveis, foram desenvolvidos para o mesmo valor de tempo de percurso, i.e. 19 unidades de tempo.

Tabela 4.10: Resultados dos testes para o tempo no sistema

No Teste	Ambiente Industrial				Razão S/R (dB) (η)
	1	2	3	4	
1	36,62	23,99	16,92	67,07	-32,24
2	52,97	38,76	31,89	90,44	-35,28
3	30,03	20,54	13,99	43,49	-29,31
4	54,51	43,05	36,51	71,22	-34,48
5	35,35	24,16	16,98	55,76	-31,17
6	50,82	38,50	31,96	74,72	-34,26
7	29,26	20,57	14,00	39,45	-28,80
8	52,36	42,66	36,46	64,92	-34,03
9	37,98	24,61	16,98	91,50	-34,28
10	54,37	39,47	32,00	112,80	-36,59
11	31,98	21,47	14,15	60,69	-31,28
12	55,48	43,80	36,61	89,40	-35,54
13	35,55	24,15	16,92	62,34	-31,77
14	52,08	39,00	31,94	86,70	-35,04
15	31,44	21,42	14,09	52,31	-30,40
16	50,69	39,46	32,70	75,51	-34,35

A análise do efeito de cada factor controlável na resposta foi desenvolvida recorrendo à razão S/R. Na Tabela 4.11 encontram-se os valores médios da razão S/R para cada um dos níveis dos factores controláveis (obtidos a partir da Tabela 4.10). Por exemplo, o efeito do factor A é determinado da seguinte forma:

$$\text{Nível } 1_A = 1/8(\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8) = -32,45 \text{ dB}$$

$$\text{Nível } 2_A = 1/8(\eta_9 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15} + \eta_{16}) = -33,66 \text{ dB} \quad (4.4)$$

$$\text{Efeito}_A = |\text{Nível } 2_A - \text{Nível } 1_A| = 1,21 \text{ dB}$$

Segundo o método de Taguchi, o nível mais favorável de cada factor, i.e. o mais robusto a perturbações dos factores de ruído, é aquele que possui o valor mais elevado da razão S/R (Ross, 1988). A diferença entre os valores da razão S/R aos níveis 2 e 1, de um factor, determina o efeito desse factor. Quanto maior for esta diferença tanto mais forte é o efeito. Com base nos dados da tabela, podemos ver que os níveis mais favoráveis para os factores controláveis, i.e. os níveis que minimizam a influência de perturbações ambientais, resultantes do nível de carga sistema, da variabilidade dos tempos de processamento e da variabilidade do intervalo entre chegadas, no desempenho do mecanismo de lançamento, são: a estratégia atemporal (nível 1_A), a estratégia de

balanceamento da carga (nível 2_B), o período de libertação de 4 unidades de tempo (nível 2_C) e o limite temporal infinito (nível 1_D).

Tabela 4.11: Efeito dos factores controláveis (dB)

Factor	Designação	Nível 1	Nível 2	Efeito
A	Contabilização da carga	-32,45*	-33,66	1,21
B	Controlo da carga	-33,63	-32,48*	1,15
C	Período de libertação	-33,83	-32,27*	1,56
D	Limite temporal	-31,15*	-34,95	3,80

* Nível mais favorável

A Tabela 4.12 mostra os resultados de uma análise de variância (ANOVA) para a razão S/R. Esta análise foi efectuada para um nível de confiança de 95%. A última coluna da tabela indica a percentagem de contribuição de cada factor na variação total, indicando o grau de influência no desempenho do mecanismo de WLC. Uma pequena variação num factor com uma elevada percentagem de contribuição, pode significar uma forte influência no desempenho do mecanismo de lançamento em termos do tempo que os trabalhos passam no sistema.

Tabela 4.12: ANOVA para a razão S/R

Fonte de variação	g.l.	SDQ	Variância	Teste - F	Contribuição (%)
Factor					
Contabilização da carga	1	5,872	5,872	88,32	6,95
Controlo da carga	1	5,283	5,283	79,45	6,24
Período de libertação	1	0,583	0,583	145,92	11,54
Limite temporal	1	9,703	9,703	865,79	68,84
Interacção					
Contabilização carga x Controlo carga	1	0,607	0,607	8,77	0,62
Controlo carga x Período libertação	1	57,568	57,568	9,12	0,65
Contabilização carga x Limite temporal	1	0,468	0,468	7,04	0,48
Período libertação x Limite temporal	1	2,977	2,977	44,78	3,49
Erro	7	0,465	0,066		1,19
Total	15	83,526			100

g.l. – graus de liberdade; SDQ – Soma dos desvios quadráticos

Pode observar-se que o limite temporal, com uma contribuição de 68,84% e o período de libertação com 11,54%, possuem grande influência no desempenho dos mecanismos, particularmente o primeiro. As dimensões de contabilização da carga ao longo do tempo

e de controlo da carga possuem percentagens menores de contribuição, 6,95% e 6,24%, respectivamente. As interacções entre os factores controláveis, à excepção da interacção entre o período de libertação e o limite temporal, não possuem percentagens de contribuição significativas, uma vez que são inferiores à contribuição do erro experimental que é de 1,19%. A interacção entre o período de libertação e limite temporal pode atribuir-se, contudo, à forma como o estudo foi conduzido. Em particular fica a dever-se ao facto de, nas experiências realizadas, um dos níveis do limite temporal ser dependente do período de libertação, i.e. *2RP*.

Os resultados obtidos sugerem que o limite temporal e o período de libertação, i.e. os parâmetros de lançamento são mais sensíveis a perturbações no sistema produtivo, decorrentes de alterações no nível de carga do sistema, da distribuição dos tempos de processamento e da distribuição do intervalo entre chegadas ao sistema, do que as dimensões de contabilização da carga ao longo do tempo e controlo da carga. Uma importante conclusão prática é que na implementação dos mecanismos de CAP baseados em WLC, especial atenção deve ser atribuída à selecção do valor a destes parâmetros.

4.3.2 Influência de um fluxo de trabalho directo

Nesta secção é analisada a influência de um fluxo de trabalhos directo. O estudo de simulação foi levado a cabo, sob as condições de operação e de controlo da produção indicadas na secção 4.2.1, considerando duas configurações distintas: *flow shop* geral e *flow shop* pura. A influência do período de libertação e do limite temporal não foi estudada. Estes factores foram fixados nos melhores níveis identificados na secção anterior, i.e. 4 unidades de tempo para o período de libertação e infinito para o limite temporal.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram a relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso, para as três estratégias de controlo da carga, quando combinadas com as duas estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo, para as configurações *flow shop* geral e *flow shop* pura, respectivamente.

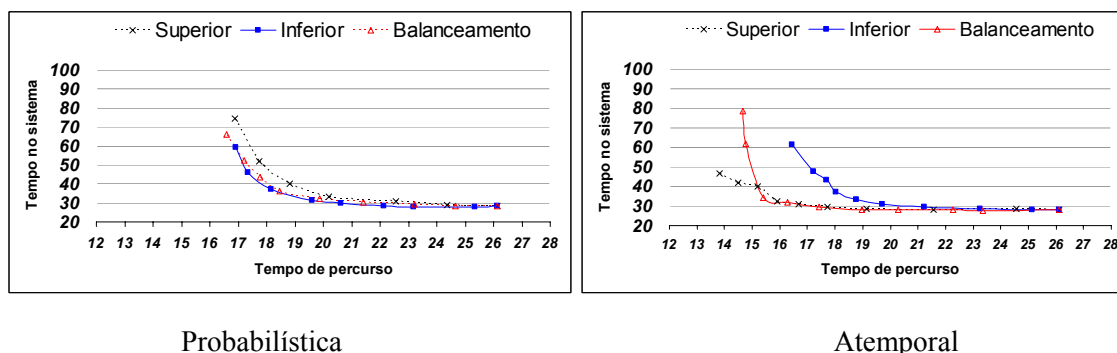


Figura 4.6: Comportamento das estratégias na configuração *flow shop* geral.

Da análise dos resultados obtidos, para a configuração *flow shop* geral, resultam três importantes conclusões.

Primeiro, o desempenho das estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo não parece ser independente da estratégia de controlo da carga usada, tal como se constatou na configuração *job shop*. Quando é usada a estratégia de controlo da carga por um limite inferior, as estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo apresentam um desempenho similar, i.e. o seu ponto crítico ocorre para um tempo de percurso próximo das 19 unidades de tempo. Contudo, quando são usadas as estratégias de controlo da carga por um limite superior ou por balanceamento, a estratégia atemporal apresenta um desempenho superior ao da estratégia probabilística, i.e. o seu ponto crítico ocorre para um tempo de percurso próximo das 16 unidades de tempo. Relativamente a uma situação de lançamento imediato, em que o tempo de percurso é de 25,1 unidades de tempo, isto representa uma redução do tempo de percurso de 36,3% na abordagem atemporal e de 24,3% na abordagem probabilística.

Segundo, a estratégia de controlo da carga por um limite inferior, quando combinada com a estratégia probabilística de contabilização da carga ao longo do tempo possui, por um lado, um desempenho similar ao da estratégia de balanceamento da carga e por outro, um desempenho superior ao da estratégia de controlo da carga por um limite superior. Contudo, quando a abordagem atemporal à contabilização da carga ao longo do tempo é usada, a estratégia de controlo da carga por um limite inferior possui um desempenho aquém do das restantes estratégias de controlo da carga, ver Figura 4.6.

Terceiro, quando é usada a abordagem atemporal, a estratégia de balanceamento não consegue melhorar o desempenho dos mecanismos, comparativamente com a estratégia

de controlo da carga por limite superior. Aparentemente, à medida que os roteiros de fabrico se tornam similares, menos trabalhos podem ser encontrados na *pool* que contribuam para melhorar o índice de balanceamento, BI, passando as estratégias a ter um desempenho similar. Note-se que neste estudo, os tempos de processamento são idênticos para todas as operações em todas as máquinas, o que torna as oportunidades de balanceamento exclusivamente dependentes dos roteiros de fabrico dos trabalhos. Contudo, quando é usada a abordagem probabilística, uma melhoria no desempenho dos mecanismos pode, ainda, ser alcançada pela estratégia de balanceamento. O método de conversão usado na abordagem probabilística transforma toda a carga a montante, de um determinado centro de trabalho, em carga directa estimada. Para cada centro de trabalho, a técnica deprecia as cargas ao longo do tempo, contabilizando apenas uma fracção da carga total. A fracção considerada, como referido na secção 2.3, altera-se ao longo do tempo. Nesta situação, as oportunidades de balanceamento passam, também, a estar associadas às variações na carga contabilizada introduzidas pelo método de cálculo, i.e. deixam de estar exclusivamente dependentes dos roteiros de fabrico. Este facto parece justificar as diferenças de desempenho observadas na Figura 4.6.

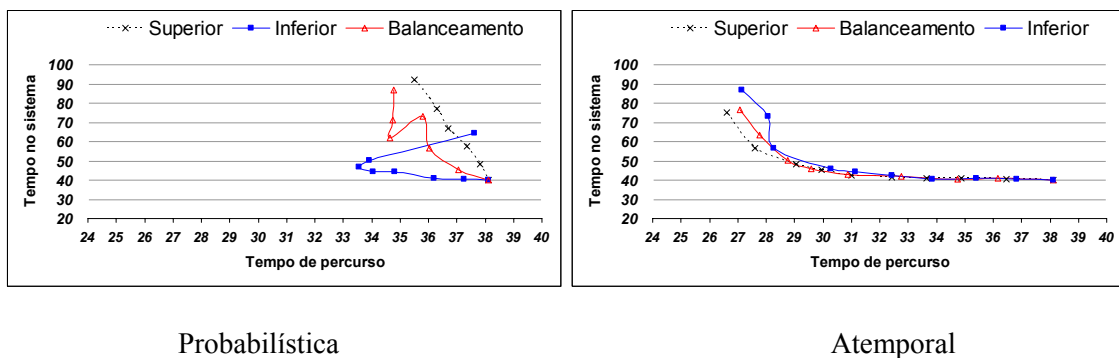


Figura 4.7: Comportamento das estratégias na configuração *flow shop* pura.

A configuração *flow shop* pura apresenta resultados aparentemente surpreendentes e inesperados.

Primeiro, as estratégias de controlo da carga apresentam um desempenho idêntico, quando a estratégia de contabilização da carga ao longo do tempo é atemporal. Isto significa que o desempenho da estratégia de controlo da carga por um limite inferior melhora significativamente quando o fluxo de trabalho é directo, comparativamente com a situação de fluxo aleatório, como é o caso do *job shop*. Na estratégia atemporal o

ponto crítico ocorre para um tempo de percurso próximo das 31 unidades de tempo. Relativamente a uma situação de lançamento imediato, em que o tempo de percurso é de 37,7 unidades de tempo, isto representa uma redução de 17,8%.

Note-se que os tempos de percurso são maiores nesta configuração de *flow shop* pura do que nas outras duas, uma vez que os trabalhos têm mais operações. Nesta configuração são realizadas 6 operações por trabalho, uma em cada máquina, enquanto nas outras são, em média, realizadas 3,6 operações por trabalho.

Segundo, como seria de esperar, numa situação de contabilização atemporal da carga ao longo do tempo, a estratégia de balanceamento da carga não consegue melhorar o desempenho dos mecanismos comparativamente com a estratégia de controlo da carga por limite superior. Isto pode ser explicado por razões idênticas às discutidas para a configuração *flow shop* geral.

Terceiro, a estratégia probabilística mostra-se incapaz de reduzir o tempo de percurso. De facto, à medida que as normas de carga se tornam restritivas, i.e. que a carga admissível nos centros de trabalho é menor, o tempo no sistema tende a aumentar significativamente sem qualquer redução importante do tempo de percurso, como se pode observar na Figura 4.7. Para a estratégia de controlo da carga por um limite inferior o tempo de percurso chega mesmo a aumentar.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam uma amostra da evolução da carga directa nos centros de trabalho 1 e 6, i.e. nos centros de trabalho mais a montante e mais a jusante da *flow shop*, para a estratégia probabilística. Os resultados da Figura 4.8 referem-se à estratégia de controlo da carga por um limite superior, enquanto os resultados na Figura 4.9 referem-se à estratégia de controlo da carga por um limite inferior.

Na Figura 4.8 pode observar-se que em certos momentos, a carga contabilizada no centro de trabalho 6 excede o limite de carga de 15 unidades de tempo. Nesta situação o lançamento de trabalhos para o espaço fabril é bloqueado e a carga no centro de trabalho 1 começa a diminuir. Contudo, como o centro de trabalho 6 continua a receber trabalho, dos centros de trabalho a montante, a carga neste centro de trabalho permanece acima do limite superior estabelecido pela norma de carga, por mais algum tempo. Isto acontece porque numa *flow shop* pura, qualquer trabalho lançado para o espaço fabril contribuirá para a carga de todos os centros de trabalho. Entretanto, e porque o

lançamento de trabalhos se encontra bloqueado, o centro de trabalho 1 começa a ficar sem material para processar, parando. Uma vez que o lançamento de trabalhos esteve bloqueado durante um certo período de tempo, a carga no centro de trabalho 6 começa a decair rapidamente chegando, esporadicamente, o centro de trabalho a parar. O tempo morto induzido pelas paragens dos centros de trabalho é consequência da retenção dos trabalhos na *pool*, o que contribui para o crescimento dos tempos de permanência ali e, conseqüentemente, do tempo no sistema. Isto explica o desempenho da abordagem probabilística quando é usado um limite superior.

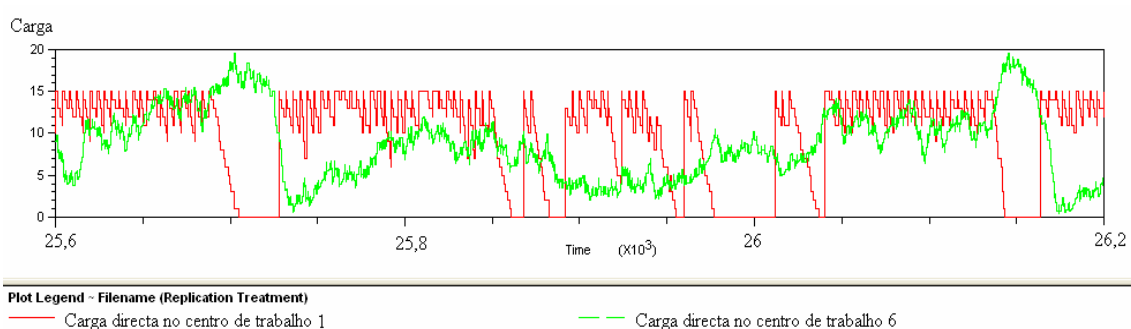


Figura 4.8: Evolução da carga directa quando é usado o controlo da carga por limite superior.

Na estratégia de controlo da carga por um limite inferior, um trabalho é lançado para o espaço fabril, sempre que a carga contabilizada em pelo menos um dos centros de trabalho da *flow shop*, se encontre abaixo do limite estabelecido pela norma de carga. Para normas restritivas, o lançamento torna-se menos frequente e os trabalhos começam a acumular na *pool*, conduzindo ao incremento do tempo de espera. Contudo, porque foi considerado um limite temporal infinito, quando o lançamento é autorizado, todos os trabalhos que se encontram na *pool* são lançados para o espaço fabril, fazendo com que a carga no primeiro centro de trabalho da *flow shop*, atinja valores particularmente elevados, como pode ser observado na Figura 4.9. Isto acontece, por um lado, porque na *flow shop* pura todos os trabalhos passam em todos os centros de trabalho e por outro, porque esta estratégia de controlo da carga por um limite inferior não impõe um limite superior à carga no espaço fabril. Uma carga elevada no espaço fabril resulta, por sua vez, no incremento do tempo de percurso e no lançamento de trabalhos para o espaço fabril com menos frequência. Este comportamento cíclico explica o desempenho

surpreendente da abordagem probabilística na *flow shop* pura, quando é usado um limite inferior.

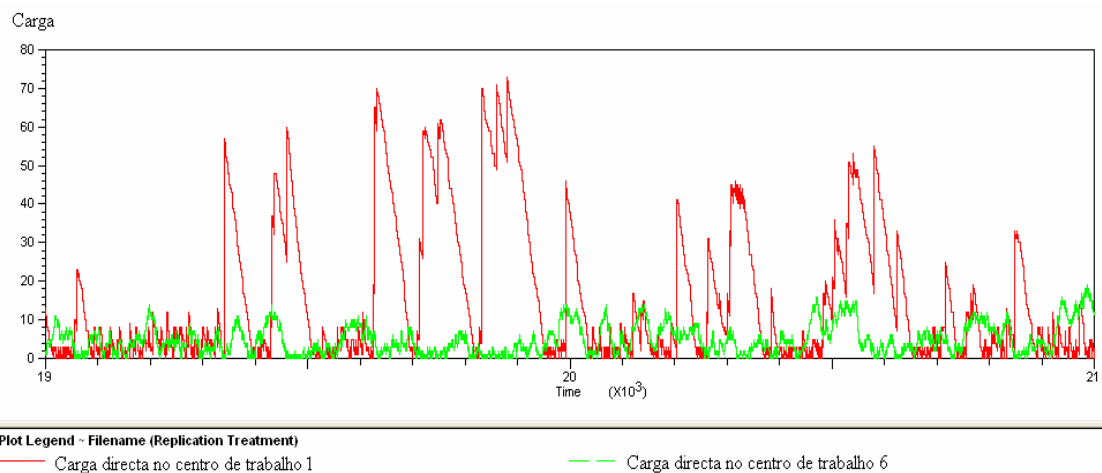


Figura 4.9: Evolução da carga directa quando é usado o controlo da carga por limite inferior.

Estes resultados ilustram o perigo de reagir às variações da carga directa dos centros de trabalho, particularmente daqueles que se encontram posicionados mais a jusante, num situação de fluxo de trabalho directo. Nesta situação, parece ser mais indicado controlar a carga agregada ou ajustada.

4.4 Conclusões sumárias

Assim, da análise e discussão dos resultados da secção 4.3.1 resultam três importantes conclusões de relevância prática:

- Não é recomendável usar em *job shop*, a estratégia de controlo da carga por limite inferior. Esta estratégia retém os trabalhos durante mais tempo na *pool* alongando os tempos de percurso.
- É recomendável usar a estratégia de controlo de carga por balanceamento. Esta estratégia de controlo da carga, para cada nível de restrição das normas de carga, apresenta valores idênticos ou inferiores do tempo no sistema em comparação com as restantes estratégias de controlo da carga.

- As estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo apresentam resultados similares podendo qualquer uma delas ser adoptada em combinação com a estratégia de balanceamento da carga.
- É recomendável fazer uma escolha criteriosa dos parâmetros de lançamento. Em geral, períodos de libertação mais longos retêm os trabalhos na *pool* durante mais tempo, resultando em tempos no sistema mais longos. Da mesma forma, restringir o conjunto de trabalhos considerados para lançamento aos mais urgentes, reduz as oportunidades de balanceamento e alonga os tempos no sistema. Em geral, todos os trabalhos da *pool* devem ser considerados para libertação no início de cada período.

Da análise e discussão dos resultados da secção 4.3.2 resultam duas conclusões importantes:

- Não é recomendável usar em *flow shop* geral, mas principalmente em *flow shop* pura, a abordagem probabilística de contabilização da carga para efeitos de lançamento.
- É recomendável usar a abordagem de controlo da carga por balanceamento, para controlo dos lançamentos, uma vez que propicia uma boa alimentação dos centros de trabalho ao mesmo tempo que assegura uma distribuição equilibrada de carga por cada um deles.

Outras conclusões relevantes são:

- No caso de *flow shops* puras, o controlo de carga por um limite superior quando a contabilização da carga é probabilística tende a desenvolver o fenómeno “starving”, i.e. falta de alimentação de postos de trabalho, de uma forma cíclica, apesar de haver trabalho para alimentação, ocasionando atrasos desnecessários e perdas de utilização do sistema.
- O controlo de carga por um limite inferior, quando a contabilização da carga é probabilística, tem a desvantagem de sobrecarregar, também ciclicamente, o sistema, tendo um impacto negativo na performance deste, i.e. aumentando os tempos de percurso e consequentemente os tempos no sistema. Tem, ainda, a desvantagem de ser necessário acautelar a concepção do sistema, nomeadamente no que se refere a capacidade de armazenagem local, principalmente nos primeiros postos, para contar com o sobre carregamento, no caso desta estratégia de controlo ser implementada. Contudo, isto é de todo não recomendável!

Capítulo 5

gPOLCA: Um Novo Mecanismo de WLC

As experiências levadas a cabo no capítulo anterior permitiram identificar a influência de um conjunto de estratégias de controlo e parâmetros de lançamento, no desempenho dos mecanismos de Controlo da Actividade de Produção (CAP) baseados em Workload Control (WLC). Assim, a questão que agora se coloca é: como melhorar o desempenho dos mecanismos de WLC?

Esta questão é baseada, por um lado, na ideia de que algumas das estratégias testadas, como é o caso da estratégia probabilística de contabilização da carga ao longo do tempo, embora possuindo um bom desempenho em *job shop*, podem resultar num desempenho desastroso numa situação de fluxo de trabalho directo, i.e. em *flow shop*; por outro, na ideia de que a escolha dos valores de parâmetros de lançamento, como o período de libertação, é particularmente delicada. Como observado no capítulo 4, a influência destes parâmetros no desempenho dos mecanismos de WLC é mais forte, do que a influência das estratégias de controlo da carga e de contabilização da carga.

Neste capítulo, estas ideias convergiram no desenvolvimento de um mecanismo de WLC baseado em cartões, com uma estratégia atemporal de contabilização da carga ao longo do tempo e com um convenção temporal contínua - o que evita a escolha do período de libertação. A escolha da estratégia atemporal foi baseada no seu desempenho e robustez quando comparada com a estratégia probabilística em diferentes configurações produtivas (ver capítulo 4).

O capítulo encontra-se organizado da seguinte forma: a secção 5.1 discute a necessidade de um mecanismo de WLC baseado em cartões; a secção 5.2 proporciona uma visão global do mecanismo proposto, comparando-o qualitativamente com o mecanismo POLCA, no qual é baseado. Por último, na secção 5.3 é realizado um estudo de simulação onde o mecanismo proposto é comparado quantitativamente com outros mecanismos de CAP, analisando e discutindo os resultados obtidos.

5.1 A necessidade de mecanismos de WLC baseados em cartões

Os mecanismos de Controlo da Actividade de Produção (CAP) baseados em cartões seguem, em geral, uma estratégia atemporal de contabilização da carga ao longo do tempo, podendo seguir tanto uma convenção temporal contínua, como discreta ou periódica.

A popularidade destes mecanismos tem vindo a crescer desde o aparecimento do TKS (Sugimori *et al.*, 1977), em particular devido à sua simplicidade e facilidade de implementação. Schonberger (1982) chegou a afirmar, a respeito do TKS, que este poderia ser instalado em 15 minutos usando alguns contentores. Contudo, a maioria dos actuais mecanismos baseados em cartões é essencialmente de reposição de existências e dedicada a ambientes de produção repetitiva. Como argumentado no capítulo 3, os mecanismos de reposição de existências, como o TKS, não são apropriados a empresas que produzam uma elevada variedade de produtos por encomenda e/ou produtos personalizados. Os mecanismos de datas programadas, como o MRP, possuem também desvantagens, nomeadamente em termos de resultarem em níveis excessivos de WIP e promoverem o alongamento dos *lead times* (ver por exemplo Hopp e Spearman, 1996).

Durante a última década, têm surgido novos mecanismos baseados em cartões, os quais procuram satisfazer a necessidade de responder rapidamente aos pedidos dos clientes. Um exemplo paradigmático é o mecanismo POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorisation), desenvolvido por Suri (1998) como parte de uma estratégia global de *Quick Response Manufacturing* (QRM). O QRM foca-se na redução dos *lead times* ao longo das actividades de um sistema produtivo. Externamente, procura responder aos pedidos ou encomendas dos clientes, concebendo e produzindo produtos

personalizados. Internamente, procura reduzir os *lead times* de todas as actividades, melhorando a qualidade e reduzindo os custos e o tempo de resposta ao cliente.

O POLCA controla o fluxo de ordens de produção, ou trabalhos, ao longo das diferentes unidades de produção, geralmente organizadas em células, através de uma combinação de autorizações de libertação e de cartões de autorização de produção, conhecidos por cartões POLCA. As autorizações de libertação são geradas por um sistema MRP de alto nível, que apenas ajuda a planear o fluxo de materiais entre células. Para cada trabalho, o sistema MRP gera uma data planeada de libertação em cada célula, estabelecendo o momento, a partir do qual, a célula pode começar a trabalhar neste. Contudo, ao contrário do MRP, visto como mecanismo de CAP, em que a produção se deve iniciar na data gerada, aqui a produção só pode ser iniciada na presença de cartões POLCA. Os cartões não são específicos de um particular tipo de trabalho, como acontece no TKS, sendo atribuídos a pares de células sucessivas no roteiro de fabrico do trabalho. Por exemplo, para os trabalhos com o roteiro de fabrico P1-F2-A4-S2 é possível identificar os pares de células P1/F2, F2/A4 e A4/S2, formando malhas de controlo como indicado na Figura 5.1. Assim, para que um particular trabalho, possa iniciar a produção numa particular célula, é necessário que existam cartões disponíveis para serem afectados ao trabalho e que a sua data planeada de libertação, conforme programado pelo sistema MRP, já tenha sido atingida.

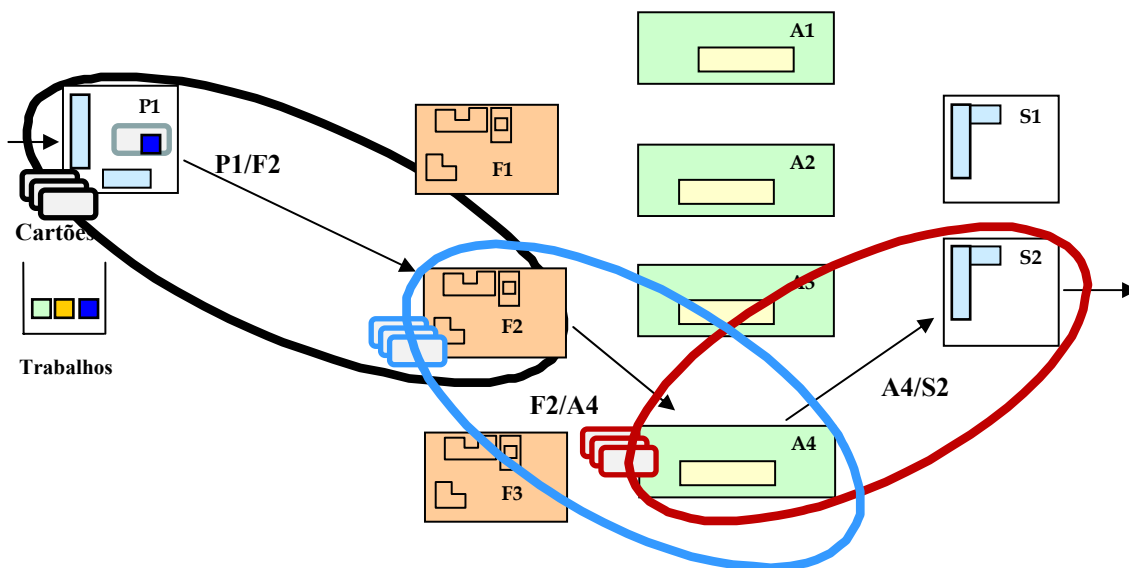


Figura 5.1: Ilustração do mecanismo POLCA.

O POLCA é, portanto, um mecanismo híbrido que combina características do MRP e do TKS. De acordo com Suri (1998), contorna as limitações dos mecanismos de reposição de existências, em ambientes de elevada variabilidade, demonstrando a sua aparente relevância no sector de produção por encomenda.

Em primeiro lugar, o uso de cartões POLCA assegura que cada célula apenas trabalha em ordens de produção, ou trabalhos, destinados a células com capacidade disponível. Ao contrário dos cartões kanban, que funcionam como um sinal de reposição de existências, os cartões POLCA funcionam como um sinal de disponibilidade de capacidade. Um cartão que retorna à primeira célula do par, i.e. à célula a montante, assinala disponibilidade de capacidade na segunda célula do par, i.e. na célula a jusante. Na situação em que não há retorno de cartões da célula a jusante, trabalhar em ordens de produção destinadas a esta célula, apenas contribui para aumentar o WIP no espaço fabril, criando desvantagens diversas. Nesta situação, é preferível usar os recursos da célula a montante, trabalhando, por exemplo, em ordens de produção que realmente sejam necessárias numa outra célula (a jusante).

Em segundo lugar, o uso de autorizações de libertação geradas pelo sistema MRP previne a criação de existências desnecessárias. Repare-se que um cartão que retorna à primeira célula do par, assinala disponibilidade de capacidade na segunda célula, mas não determina o trabalho a processar. É necessário usar a lista dos trabalhos com autorização de libertação, gerada pelo MRP, para tomar esta decisão. Se não existirem trabalhos nesta lista, então nenhum trabalho inicia o seu processamento na célula, mesmo que existam cartões POLCA disponíveis.

Recentemente Vandaele *et al.* (2005) implementaram o mecanismo POLCA com um sistema de cartões virtuais, i.e. electrónicos.

Embora novos mecanismos baseados em cartões tenham surgido recentemente, não têm, contudo, sido propostos mecanismos deste tipo para WLC. Ainda que o desenvolvimento de mecanismos simples de WLC seja, particularmente, relevante para indústrias como as PME's a operar no sector de produção por encomenda. Segundo Stevenson *et al.* (2005a) estas empresas são relutantes a alterações nas suas filosofias de planeamento e controlo da produção, a não ser que sejam fáceis de implementar, de custo reduzido e tenham uma necessidade reduzida de dados.

Neste capítulo, procura-se colmatar esta lacuna elaborando um mecanismo para WLC que adopta os princípios do POLCA. O mecanismo proposto, designado de gPOLCA (*generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*) pode ser usado na produção em *job shops* e *flow shops* em ambiente de produção por encomenda. Recentemente as *flow shops* têm ganho importância na produção em baixos volumes de produtos personalizados (Boysen *et al.*, 2007), o que indica a sua adequação na produção por encomenda. Além de outras razões para a sua adequação, pode referir-se a flexibilidade do equipamento, que através de trocas fáceis de ferramentas, permite sequências operatórias diversas de diferentes artigos a custos de set-up praticamente negligíveis. Isto significa que o desenvolvimento de mecanismos de WLC adequados à produção em *flow shops* é cada vez mais relevante.

5.3 Mecanismo gPOLCA

O gPOLCA (Fernandes e Silva, 2006) é um mecanismo de WLC baseado no mecanismo POLCA. Tal como este, controla o lançamento de trabalhos para o espaço fabril através de uma combinação de datas de libertação e de autorizações de produção. O mecanismo é implementado como um sistema de cartões, os quais são atribuídos a pares de centros de trabalho sucessivos no roteiro de fabrico do trabalho. Contudo, ao contrário do POLCA, em que os cartões limitam a carga directa em cada par de centros de trabalho, no gPOLCA estes limitam a carga ajustada (ver secção 2.3). Este também não requer a geração, para cada centro de trabalho, de uma lista de ordens de produção e respectiva data planeada de libertação, baseando-se numa *pool*, a partir da qual os trabalhos são lançados para o espaço fabril.

Virtualmente, o gPOLCA pode ser visto com um sistema *zero existências*, no sentido em que a reposição de existências, componentes ou produtos finais, não é autorizada. A ideia básica é a de manter um stock de cartões de autorização de produção a circular no espaço fabril, em vez de manter stocks de componentes e/ou produtos finais.

5.3.1 Modo de operação

O gPOLCA usa cartões para controlar a carga, ou WIP, no espaço fabril. Estes cartões não são específicos de um particular tipo de trabalho, ou ordem de produção, sendo

atribuídos a pares sucessivos de centros de trabalho no roteiro de fabrico do trabalho. Embora os cartões sejam usados para limitar a carga que pode ser lançada para os pares de centros de trabalho a que pertencem, são recolhidos e afectados ao trabalho no momento do lançamento. Na prática, os cartões acabam por circular entre o primeiro e cada um dos outros centros de trabalho do roteiro fabrico do trabalho (ver Figura 5.2), traduzindo-se predominantemente em malhas de controlo bastante mais longas do que aquelas usadas no mecanismo POLCA (ver Figura 5.1). O mesmo cartão pode ser reutilizado e afectado a diferentes trabalhos ao longo do tempo, desde que estes necessitem processamento no par de centros de trabalho a que o cartão pertence. O gPOLCA limita, assim, a carga no espaço fabril, fixando o número de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho.

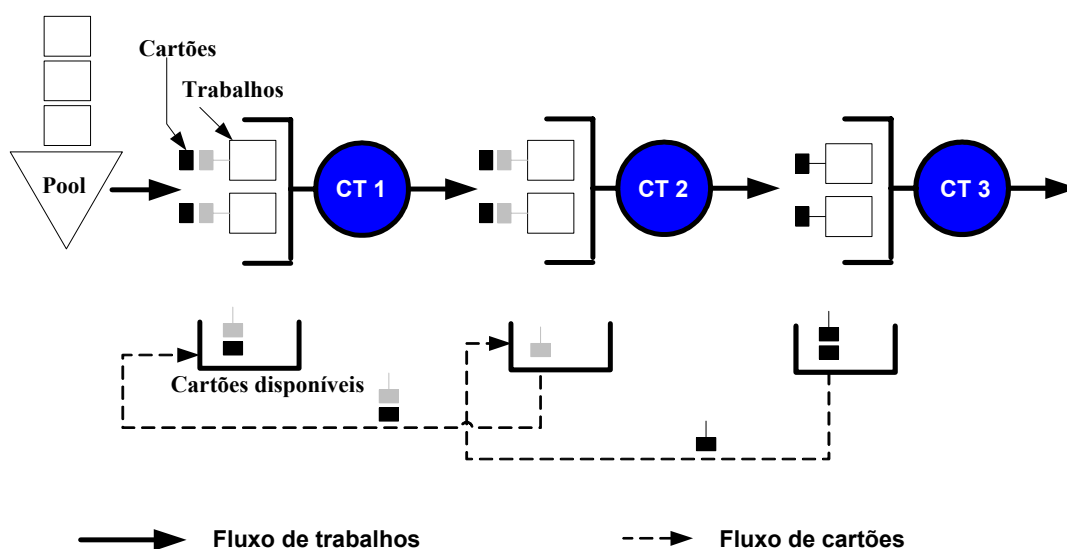


Figura 5.2: Ilustração do mecanismo gPOLCA.

A Figura 5.2 ilustra o fluxo de trabalhos e cartões no gPOLCA para uma *flow shop* com três centros de trabalho. Para que um particular trabalho seja lançado para o espaço fabril, é necessário que se verifiquem cumulativamente duas condições: a disponibilidade de cartões provenientes de todos os pares de centros de trabalho, do roteiro de fabrico desse trabalho, e que a data planeada de libertação do trabalho se encontre dentro de um determinado limite temporal contado a partir da data actual. Uma vez lançado, o trabalho é empurrado de centro de trabalho para centro de trabalho até que este seja concluído. O mecanismo actua activando a produção nos centros de

trabalho, sempre que existe material para ser processado, independentemente dos níveis de existências nos centros de trabalho a jusante.

O gPOLCA opera de acordo com as seguintes regras, relativamente à forma como os cartões são manipulados:

Regra 1: todos os cartões requeridos por um trabalho, em cada par de centros de trabalho do seu roteiro de fabrico, são afectados a este no momento em que é lançado para o espaço fabril, i.e. no momento em que entra no primeiro centro de trabalho do seu roteiro de fabrico.

Note-se que num par de centros de trabalho pode ser necessário atribuir mais de um cartão ao trabalho, dependendo da carga associada a cada cartão.

Regra 2: quando um trabalho chega a um qualquer centro de trabalho, o seu processamento pode iniciar-se de imediato, desde que todos os recursos e materiais necessários se encontrem disponíveis.

Podem ser usados mecanismos de despacho, v.g. regras de prioridade como FIFO, para decidir qual, dos trabalhos que se encontram em fila de espera, deve ser o próximo a processar.

Regra 3: os cartões permanecem com o trabalho desde que este é lançado, até que é processado pelo segundo centro de trabalho do par a que pertencem, i.e. o centro de trabalho a jusante.

Regra 4: os cartões dissociados dos trabalhos ficam disponíveis para serem afectados a novos trabalhos, cujo roteiro de fabrico inclua o par de centros de trabalho a que esses cartões estão atribuídos.

Estas regras estabelecem características diferenciadoras do gPOLCA relativamente ao POLCA. Enquanto que o primeiro efectua um controlo detalhado ao nível do lançamento, o segundo efectua um controlo detalhado ao nível do fluxo de materiais. O lançamento de trabalhos para o espaço fabril, no gPOLCA, é feito atendendo à carga (agregada) em todos os pares de centros de trabalho do seu roteiro de fabrico. No POLCA, apenas o estado do par de células, ou centros de trabalho, formado pelas duas primeiras células do roteiro de fabrico é considerado para lançamento. Relativamente ao controlo do fluxo de materiais, este é feito no POLCA com base em autorizações de

libertação, autorizações de produção e na disponibilidade de materiais. No *gPOLCA*, a disponibilidade de materiais é suficiente para activar a produção nos diversos centros de trabalho.

No *POLCA*, um cartão pertencente a uma par de células ou de centros de trabalho, por exemplo ao par P1/F2, ver Figura 5.1, é afectado ao trabalho quando este entra na primeira célula do par, i.e. P1, permanecendo com este mesmo após a sua conclusão na segunda célula do par, i.e. F2, e até entrar na próxima célula do seu roteiro de fabrico, i.e. A4. Só nesta altura o cartão é dissociado do trabalho, ficando livre para ser afectado a um novo trabalho. No *gPOLCA*, um cartão pertencente a um par de centros de trabalho, por exemplo ao par 2/3, ver Figura 5.2, é afectado ao trabalho logo que este entra para o espaço fabril, i.e. no centro de trabalho 1, permanecendo com este até à sua conclusão no centro de trabalho a jusante, do par a que pertence, i.e. no centro de trabalho 3. Nesta altura o cartão fica de imediato disponível para ser atribuído a um novo trabalho.

No *gPOLCA*, o lançamento de trabalhos ou ordens de produção para o espaço fabril, não é feito de imediato, i.e. logo que estes chegam ao sistema e que materiais, equipamentos, ferramentas, documentos, etc. ficam disponíveis. Os trabalhos são recolhidos numa *pool*, onde aguardam pelo seu lançamento. O procedimento usado pelo mecanismo para lançar os trabalhos ou ordens de produção para o espaço fabril é o seguinte:

Passo 1: para cada trabalho que se encontra na *pool* é determinada uma data planeada de libertação, a qual é obtida por subtracção dos *lead times* de produção das datas de entrega dos trabalhos.

Passo 2: os trabalhos são considerados para lançamento de acordo com a data mais cedo planeada de libertação. Apenas os trabalhos com uma data planeada de libertação dentro do limite temporal são considerados.

Passo 3: o lançamento de um trabalho para o espaço fabril ocorre logo que todos os cartões requeridos por este se encontrem disponíveis para afectação.

Passo 4: os trabalhos para os quais algum dos cartões requeridos não se encontra disponível são mantidos na *pool*. Os trabalhos não são lançados até que a situação se

altere, i.e. até que a carga em todos os pares de centros de trabalho do seu roteiro de fabrico se situe abaixo do nível planeado.

5.3.2 Parâmetros

Os parâmetros necessários ao mecanismo gPOLCA são os seguintes:

LT_j Representa o *lead time* em cada centro de trabalho, j , usado, por exemplo, para determinar as datas planeadas de libertação, r_i , de cada trabalho i . Assim, assumindo que d_i é a data de entrega prometida de i e que S_i é o conjunto de centros de trabalho no roteiro de fabrico de i , então, a data planeada de libertação de i é dada por:

$$r_i = d_i - \sum_{j \in S_i} LT_j \quad (5.1)$$

θ Representa o limite temporal. Apenas os trabalhos i com $r_i \leq t + \theta$ são incluídos no conjunto de trabalhos a considerar para lançamento, sendo t o instante em que os trabalhos são considerados para lançamento. O limite temporal tem como objectivo evitar o lançamento dos trabalhos demasiado cedo.

q Representa a carga associada a cada cartão. Isto é necessário para: (a) estabelecer o número adequado de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho, com base nos níveis de carga planeados; (b) calcular o número de cartões que será necessário afectar a cada ordem de produção ou trabalho. Na prática, devido a diferenças no número de horas de trabalho requeridas pelos diferentes trabalhos, será de esperar que um número diferente de cartões seja afectado a cada trabalho, em cada par de centros de trabalho. Note-se, que a carga associada ao cartão deve ser suficientemente pequena, para cobrir todo o espectro de tempos de processamento requeridos pelos trabalhos. Contudo, se esta for demasiado pequena poderá resultar num elevado número de cartões a circular no espaço fabril.

$c_{a,b}$ Representa o número de cartões a atribuir a cada par a/b de centros de trabalho, i.e. estabelece um limite superior à carga ajustada de a/b . A carga ajustada pode, contudo ser vista como uma estimativa da carga directa futura

de a/b , ver secção 2.3. Assim, a carga directa de a/b , resultante do conjunto de trabalhos I com roteiro por a/b , pode, com base na equação 2.4, ser estimada como:

$$\tilde{L}_{a,b}^D = \sum_{i \in I} \frac{LT_{a,b}}{LT_{a,b} + LT_{i,Ua}} \cdot (p_{i,a} + p_{i,b}) \quad (5.2)$$

Em que $LT_{a,b}$ é o *lead time* em a/b e $LT_{i,Ua}$ é o *lead time* até a , ou seja, resulta da soma do *lead time* em cada um dos centros de trabalho que se encontram a montante de a no roteiro de fabrico de i ; $p_{i,a}$ e $p_{i,b}$ são, respectivamente, os tempos de processamento do trabalho i em a e em b . A equação 5.2, facilita a determinação do número de cartões $c_{a,b}$ a atribuir a cada par de centros de trabalho, sendo independente dos roteiros de fabrico dos trabalhos.

De facto, sendo $\tilde{L}_{a,b}^D$ uma estimativa da carga directa no par de centros de trabalho a/b , quando um trabalho i é lançado para o espaço fabril contribui com $c_{a,b}^i$ cartões, como especificado na equação 5.3, para essa carga.

$$c_{a,b}^i = \frac{LT_{a,b}}{LT_{a,b} + LT_{i,Ua}} \cdot (p_{i,a} + p_{i,b}) / q \quad (5.3)$$

Por exemplo, para um sistema de produção com 3 centros de trabalho ($j=1, 2$ e 3) em que $q=1/3$ horas. Se $LT_j=1,5$ horas para $\forall j$, o número de cartões provenientes do par de centros de trabalho $2/3$, que será necessário afectar no momento do lançamento a um trabalho i , com $p_{i,2}=1$ hora e $p_{i,3}=1$ hora, de acordo com a equação 5.3, é de 4, por ser $LT_{2,3}=LT_2+LT_3=3$ horas e $LT_{i,U2}=LT_1=1,5$ horas (caso em que o trabalho tem 3 operações e a primeira é realizada no centro $j=1$).

A escolha adequada destes parâmetros de lançamento, em particular do número de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho, é uma decisão delicada. Como se sabe, uma das consequências da lei de Little é que aumentando o número de cartões, i.e. o WIP, para além de um valor crítico, apenas conduzirá a aumentos do WIP e consequentemente dos tempos de percurso, sem um incremento significativo da taxa de produção (TP) do sistema. Assim, o número de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho deverá ser tal, que permita alcançar a TP desejada com o mínimo WIP. Uma

abordagem prática, consiste em operar o sistema produtivo durante um determinado período de tempo, com um número de cartões superior ao que parece ser o óptimo. De seguida o número de cartões deve ser gradualmente reduzindo, monitorizando cuidadosamente os correspondentes WIP e TP, até que um ponto desejado na curva taxa de produção vs. WIP seja alcançado.

5.3.3 Classificação

O gPOLCA pode ser classificado, relativamente às nove dimensões fundamentais dos mecanismos de CAP (ver capítulo 3), como se segue:

- A estratégia de lançamento é híbrida de datas programadas e limitação de carga, uma vez que os trabalhos são lançados para o espaço fabril atendendo à sua urgência, i.e. a datas planeadas de libertação e ao estado (congestionamento) do espaço fabril. Isto torna o mecanismo adequado para o sector de produção por encomenda, ao contrário dos mecanismos de reposição de existências, particularmente adequados para ambientes de produção repetitiva e procura estável.
- A estratégia de controlo do fluxo de materiais é *push*, uma vez que o sistema opera activando a produção nos centros de trabalho sempre que existe material para ser processado, independentemente dos níveis de existências nos centros de trabalho a jusante.
- A convenção temporal é contínua, uma vez que os lançamentos podem ocorrer a qualquer momento durante a operação do sistema, i.e. não são feitos, por exemplo, apenas no início de cada semana, dia ou turno de trabalho.
- A medição da carga é feita em termos da quantidade de trabalho (v.g. em horas de trabalho), e não do número de trabalhos.
- A agregação da carga é feita por pares de centros de trabalho.
- A contabilização da carga ao longo do tempo é atemporal, i.e. um trabalho lançado para o espaço fabril adiciona instantaneamente carga a todos os grupos de capacidade por onde passa.
- O controlo da carga é feito por meio de um limite superior à carga em cada grupo de capacidade, associado ao número de cartões que lhe é afecto.

- O planeamento da capacidade é passivo, uma vez que a capacidade de cada centro de trabalho é assumida como dada, não sendo manipulada pelo mecanismo.
- A visibilidade do programa de lançamentos planeados é limitada, uma vez que o mecanismo é apenas informado das ordens ou trabalhos que se encontram maduros no período de planeamento que se vai iniciar.

5.4 Estudo de simulação

No sentido a avaliar o desempenho do *gPOLCA*, este foi comparado, via simulação, com outros dois mecanismos de CAP, nomeadamente o MRP e o POLCA. O desempenho do mecanismo foi analisado sob diferentes condições de mistura de produtos, num ambiente produtivo de elevada variabilidade. O estudo foi realizado usando o software ARENA (Kelton *et al.*, 2001). No anexo A.2 encontra-se a lista de código SIMAN de uma versão representativa dos modelos de simulação desenvolvidos e usados neste estudo.

As medidas de desempenho avaliadas representam a média de 50 replicações IID (Independentes e Identicamente Distribuídas) realizadas ao longo de 96000 unidades de tempo. Para anular quaisquer efeitos transientes foi usado um período inicial de aquecimento de 9600 unidades de tempo. Isto significa que foram recolhidos dados durante 86400 unidades de tempo.

5.4.1 Modelo

O estudo de simulação foi levado a cabo num sistema produtivo similar ao usado por Krishnamurthy *et al.* (2004) num estudo do desempenho dos mecanismos MRP e TKS. As seguintes suposições foram feitas relativamente à configuração física e operacional do sistema produtivo modelado:

- Uma flow shop pura com três centros de trabalho.
- Uma única máquina em cada centro de trabalho.
- O processo de chegada de procura do produto i segue uma distribuição de Poisson como uma taxa média λ_i .

- O tempo de processamento do produto i ($i=1$ e 2), na máquina j ($j= 1, 2, \text{ e } 3$), encontra-se exponencialmente distribuído.
- Os tempos de preparação são independentes da sequência de processamento dos produtos e assumidos como parte do tempo de processamento.
- A possibilidade de avaria das máquinas não é explicitamente considerada, i.e. assume-se que as máquinas são fiáveis.
- A regra de prioridade FIFO é usada em todas as filas de espera.
- A informação relativa ao manuseamento de cartões de autorização de produção é transmitida instantaneamente.

Por simplicidade, assumiu-se que cada centro de trabalho da *flow shop* possui uma única máquina. Assumiu-se, também, que a primeira máquina a ser visitada pelos produtos possui sempre disponibilidade de matérias-primas. No sentido de modelar um ambiente produtivo de elevada variabilidade, foram usadas as distribuições de Poisson e Exponencial, para a taxa de chegadas e para os tempos de processamento, respectivamente.

As medidas de desempenho de principal interesse para o estudo, usadas para avaliar os três mecanismos de CAP são a TP, o WIP e o tempo de percurso. Mais especificamente os mecanismos são comparados, determinando o mínimo WIP e o tempo de percurso, requerido para alcançar uma determinada TP. O WIP não inclui trabalhos cujo lançamento tenha sido autorizado até serem carregados no primeiro centro de trabalho do seu roteiro de fabrico.

No mecanismo MRP as datas de libertação de cada produto, ou trabalho, são determinadas por programação regressiva a partir das datas de entrega. Uma vez lançado, o trabalho é simplesmente empurrado de centro de trabalho em centro de trabalho até que este esteja concluído. Consequentemente, no MRP a taxa de lançamento ou de libertação determina a TP da *flow shop*, assim como o nível de existências em cada centro de trabalho. Neste caso, para cada valor da TP o correspondente WIP é medido e registado.

Enquanto no MRP, a taxa de libertação é o único parâmetro de lançamento, nos mecanismos POLCA e gPOLCA, além desta, é necessário especificar o número de

cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho. Neste caso, foi efectuada uma pesquisa por intermédio de um conjunto alargado de experiências de simulação, para encontrar o menor número de cartões, i.e. WIP, que resulta na TP desejada.

5.4.3 Análise e discussão dos resultados

Para cada medida de desempenho analisada, WIP, TP e tempo de percurso, foram construídos intervalos de confiança de 95% com base na distribuição *t* student (ver p. ex., Law e Kelton 2000). O teste de Kolmorov Smirnov à normalidade dos dados foi levado a cabo, não se tendo encontrado evidência estatística para rejeitar a hipótese nula a um nível de confiança de 95% (valor $p < 0,05$).

Quando a discussão dos resultados menciona diferenças significantes entre mecanismos de CAP, isto é baseado no resultado de *paired t-tests* com um nível de confiança de 95%.

Caso de mistura homogénea de produtos

No primeiro conjunto de experiências realizado, o desempenho do mecanismo gPOLCA foi comparado com o desempenho dos mecanismos MRP e POLCA, em condições de procura variável e mistura homogénea de produtos.

Assim, admitindo que o processo de chegada de procura do produto *i* segue uma distribuição de Poisson com uma taxa média λ_i , o tempo entre as datas de entrega de pedidos sucessivos do produto *i* é de $1/\lambda_i$. Assumiu-se, ainda, uma razão entre taxas de chegada de procura $\lambda_1/\lambda_2 = 1$ e tempos de processamento, $p_{i,j}$, idênticos para os produtos, *i*, em todos os centros de trabalho, *j*, seguindo uma distribuição Exponencial de média 1. Os valores de λ_i e de $p_{i,j}$ foram escolhidos de forma a manter a *flow shop* balanceada. Nesta situação a capacidade da *flow shop*, i.e. a taxa máxima de produção é de um produto por unidade de tempo. Com base nisto foram realizadas experiências para diferentes taxas médias de chegada de procura total, λ , entre 0,5 e 0,95, em que:

$$\lambda = \sum_{i=1}^2 \lambda_i \quad (5.4)$$

Os mecanismos foram comparados com base em curvas características que relacionam o WIP com a TP. Estas curvas descrevem o WIP como função da TP. Sabe-se que à medida que TP se aproxima da capacidade da *flow shop*, i.e. de 1 unidade de artigo por unidade de tempo, o WIP tende para infinito (v.g. Glassey e Resende, 1988).

Na Figura 5.3, encontram-se representadas as curvas características, obtidas por simulação, dos três mecanismos testados. Um ponto na curva é o resultado de simular o mecanismo a valores específicos do número de cartões e/ou da taxa de libertação, para os quais se alcança uma determinada TP com o menor WIP. Um mecanismo de CAP possui um desempenho superior a outro, se alcançar uma dada TP com uma menor quantidade de WIP.

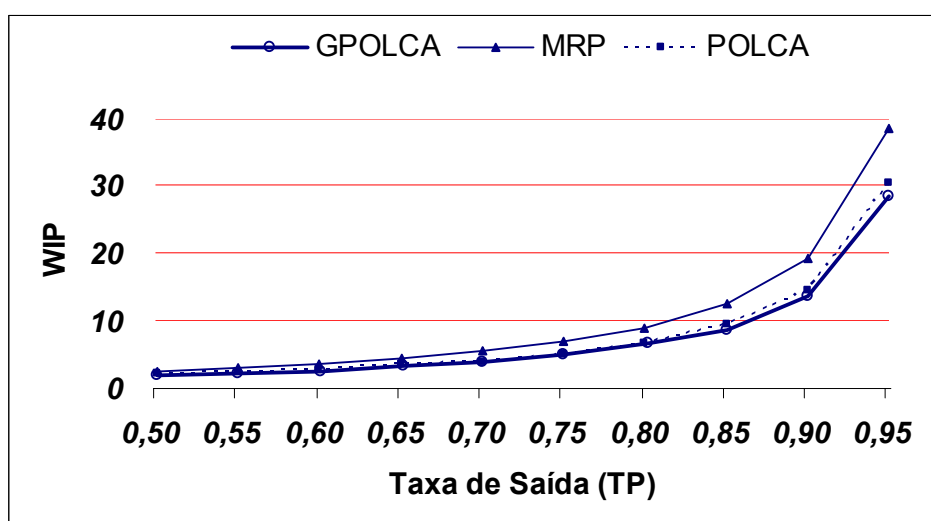


Figura 5.3: Comportamento dos mecanismos sob uma mistura homogênea de produtos.

Na Tabela 5.1 foram registados os valores de WIP e de tempo de percurso obtidos por cada mecanismo, para alcançar uma taxa de produção de 0,95. Foram identificadas diferenças significantes no desempenho dos três mecanismos.

Tabela 5.1: Resultados globais sob uma mistura homogênea de produtos

Mecanismo	TP	WIP	Tempo percurso (F)
MRP	0,95 ± 0,0037	38,58 ± 0,96	40,60 ± 0,98
POLCA	0,95 ± 0,0032	30,37 ± 0,39	31,97 ± 0,40
gPOLCA	0,95 ± 0,0036	28,37 ± 0,34	29,87 ± 0,33

Analisando os resultados obtidos, as seguintes observações podem ser feitas:

- Nas condições produtivas consideradas, os mecanismos POLCA e gPOLCA possuem um desempenho superior ao mecanismo MRP. O WIP requerido para alcançar uma determinada TP tende a ser mais elevado no MRP, particularmente para níveis elevados da TP, ver figura 5.3.
- Os resultados do gPOLCA são claramente superiores aos do MRP, melhorando para níveis mais elevados da TP. Para uma TP de 0,95, passar do mecanismo MRP para o mecanismo gPOLCA produz uma redução do WIP de 26,5%. Isto significa que a mesma TP pode ser obtida com o gPOLCA, mas com menores valores de WIP, como indicado na Tabela 5.2. O tempo de percurso também é menor, como se poderia esperar da lei de Little.
- Para uma amplitude alargada de valores da TP, o gPOLCA e o POLCA possuem desempenhos idênticos no que se refere ao WIP. Contudo, para os níveis mais elevados da TP, o gPOLCA possui um desempenho superior ao POLCA. De facto, para uma TP de 0,95, passar do mecanismo POLCA para o mecanismo gPOLCA reduz o WIP em 6,6%.

As implementações bem sucedidas do TKS assim como os estudos desenvolvidos para sistemas de produto único conduziram à ideia de que o desempenho dos mecanismos de reposição de existências é, em geral, superior ao dos mecanismos de datas programadas (v.g. Womack e Jones, 1996). De facto, para o caso produto único a superioridade do TKS sobre o MRP foi relatada por autores como Spearman e Zazanis (1992) e Hopp e Spearman (1996), entre outros. Para o caso multi-produto sob condições de mistura homogénea, Krishnamurthy *et al.* (2004) concluíram que os mecanismos de datas programadas, como o MRP, possuem um desempenho superior aos mecanismos de reposição de existências, como o TKS, em termos de WIP e nível de serviço. Este último é definido pelos autores como a proporção de trabalhos que satisfaz as datas de entrega.

Este resultado é particularmente interessante, uma vez que o ambiente produtivo em causa é, geralmente, considerado apropriado à introdução do TKS. Os autores sugerem que, em parte, a diferença de comportamento se fica a dever ao WIP *residente*, i.e. a quantidade mínima de WIP que é mantida pelo TKS para cada produto em cada centro

de trabalho. Como observado no capítulo 3, o TKS é um mecanismo de reposição de existências, necessitando de uma quantidade mínima de WIP para que possa operar. Em contraste, nos mecanismos de datas programadas como o MRP, o WIP mínimo é zero.

Uma diversidade crescente de produtos pode, ainda, resultar num intervalo médio entre chegadas, para os diferentes produtos, substancialmente maior que os tempos médios de percurso (Krishnamurthy *et al.*, 2004). Nesta situação, o TKS acabará por iniciar a reposição de existências com um avanço grande relativamente à procura, resultando num excesso de WIP no espaço fabril. Pelo contrário, nos mecanismos de datas programadas, quando os lançamentos são baseados em encomendas firmes e estimativas precisas dos tempos de percurso, os trabalhos lançados para o espaço fabril são usados para satisfazer a procura logo que são concluídos, ou num prazo curto após estes terem sido concluídos, resultando em menos WIP no espaço fabril. De facto, os mecanismos de datas programadas usam informação acerca da procura esperada para lançar os trabalhos em conformidade, i.e. incorporam uma característica de olhar-a-diante.

Assim, podendo o MRP desempenhar melhor que o TKS no caso multi-produto, como sugerido em Krishnamurthy *et al.* (2004), os resultados acima apresentados mostram, que os mecanismos híbridos, como o gPOLCA e o POLCA, podem desempenhar melhor do que os mecanismos de datas programadas, como o MRP. Por um lado, sendo mecanismos híbridos, o WIP residente deixa de ser o factor dominante, como acontece no TKS; por outro, ao mesmo tempo que incorporam informação sobre a procura esperada, limitam, também, o WIP no espaço fabril. Isto permite-lhes lidar com situações de informação menos precisa relativamente à procura e aos tempos de percurso. O resultado é menos WIP no espaço fabril, para uma gama ampla de valores da TP.

Caso de mistura não homogénea de produtos

No segundo conjunto de experiências realizadas, o desempenho do mecanismo gPOLCA foi comparado com o desempenho dos mecanismos MRP e POLCA, na presença de alterações na mistura dos produtos. Neste caso, os produtos podem diferir nas taxas de chegada de procura, nos tempos de processamento nas máquinas ou em ambos.

As alterações consideradas ocorrem ao longo de um curto período de tempo (1440 unidades de tempo). Durante este período o valor dos parâmetros de lançamento dos mecanismos é mantido inalterado. Em particular, foram estudadas alterações na TP da *flow shop* em resultado de alterações na razão das taxas de procura e de tempos de processamento, dos dois produtos. Tendo em vista a comparação com o primeiro conjunto de experiências realizadas, foi estabelecido o valor de 1/2 para a razão de taxas de procura, λ_1/λ_2 , e o valor de 2 para a razão de tempos de processamento, $p_{1,j}/p_{2,j}$. Desta forma, o tempo médio de serviço esperado em cada centro de trabalho mantém-se igual a 1 unidade de tempo (equação 5.5). Isto garante que a *flow shop* permanece balanceada.

$$\frac{\lambda_1 p_{1,j} + \lambda_2 p_{2,j}}{\lambda_1 + \lambda_2} = 1 \quad \text{para todo } j \quad (5.5)$$

Na Figura 5.4, encontram-se representadas as curvas características que relacionam o WIP com a TP na *flow shop*, para cada um dos mecanismos testados.

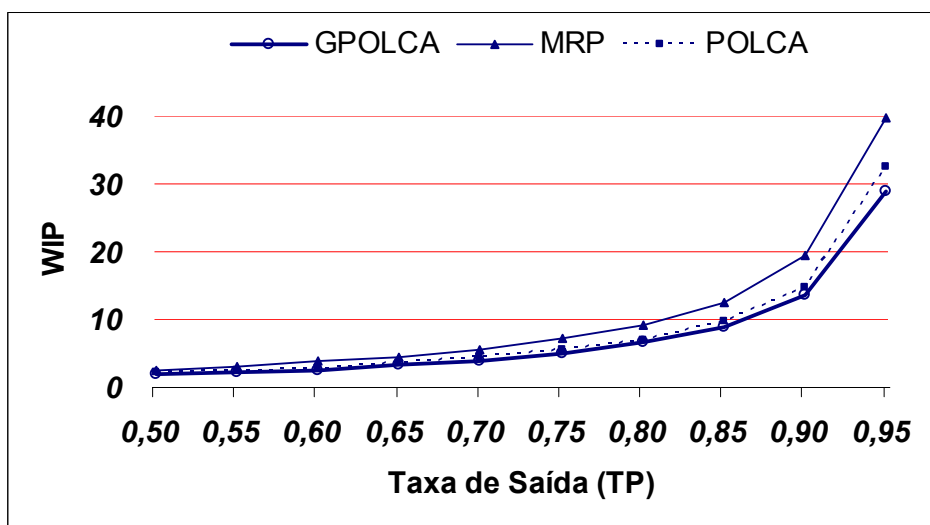


Figura 5.4: Comportamento dos mecanismos sob alterações na mistura de produtos.

Na Tabela 5.2 foram registados os valores médios de WIP e de tempo de percurso obtidos por cada mecanismo, para alcançar uma TP de 0,95. Foram identificadas diferenças significantes no desempenho dos mecanismos.

Tabela 5.2: Resultados globais sob alterações na mistura de produtos

Mecanismo	TP	WIP	Tempo percurso (F)
MRP	0,95 ± 0,0032	39,74 ± 1,22	41,81 ± 1,26
POLCA	0,95 ± 0,0026	32,43 ± 0,38	34,14 ± 0,39
gPOLCA	0,95 ± 0,0030	28,77 ± 0,35	30,31 ± 0,35

Analisando os resultados obtidos, neste segundo conjunto de experiências, as seguintes observações podem ser feitas:

- Na presença de alterações na mistura de produtos, o desempenho dos mecanismos deteriora-se, i.e. o WIP necessário, para alcançar os mesmos valores de TP, tende a ser maior. Isto acontece porque as alterações na mistura de produtos, afectando os tempos de processamento e as taxas de chegada de procura, incrementam a variabilidade no sistema. Perante um aumento da variabilidade é necessário mais WIP no sistema para garantir os mesmos valores de TP.
- Enquanto o desempenho de todos os mecanismos se deteriora em condições de maior variabilidade, o impacto destas variações é menor no mecanismo gPOLCA. De facto, no gPOLCA o WIP deteriora-se em 1,4%, em relação à situação de mistura homogénea de produtos, enquanto no POLCA deteriora-se em 6,8% e no MRP em 3,0%.
- Consistentemente, os mecanismos POLCA e gPOLCA mostram possuir um desempenho superior em termos de WIP e tempo de percurso, relativamente ao mecanismo MRP.
- Sob alterações na mistura de produtos e para uma TP de 0,95, passar do POLCA para o gPOLCA produz uma redução do WIP de 11,3%, enquanto que passar do MRP para o gPOLCA a redução é de 27,6%. Como seria de esperar, uma redução similar no tempo de percurso é também notada.

Os resultados obtidos parecem indicar que o gPOLCA além de resultar em menores níveis de WIP é uma abordagem mais robusta. De facto, o mecanismo é menos sensível à variabilidade resultante de alterações na mistura de produtos.

O mecanismo POLCA impõe níveis rígidos de trabalho em curso de fabrico em cada par de centros de trabalho ou células. Para *flow shops* com elevados volumes de produção este controlo rígido poderá resultar num melhor desempenho do sistema produtivo.

Contudo, numa situação de produção de uma maior diversidade de produtos por encomenda e/ou produtos personalizados, os mecanismos devem possuir um grau de flexibilidade que permita adaptarem-se facilmente às alterações do ambiente produtivo. O processo de controlo associado a malhas mais longas, que nascem no lançamento, como se referiu no início da secção 5.3.1, introduz flexibilidade de controlo no gPOLCA que conjugada com estratégia *push* de controlo do fluxo de materiais, autorizando a produção nos centros de trabalho independentemente dos níveis de carga nos centros de trabalho mais a jusante, podem contribuir decisivamente para o melhor desempenho do gPOLCA em relação ao POLCA.

A Figure 5.5 mostra a distribuição do WIP pelos três centros de trabalho da *flow shop*. Como se pode observar, o gPOLCA e o MRP possuem um padrão similar. Isto reflecte o facto de ambos implementarem uma estratégia *push* de controlo do fluxo de materiais. Contudo, os níveis de WIP são bastante mais baixos no gPOLCA, uma vez que este, também limita a carga lançada para o espaço fabril.

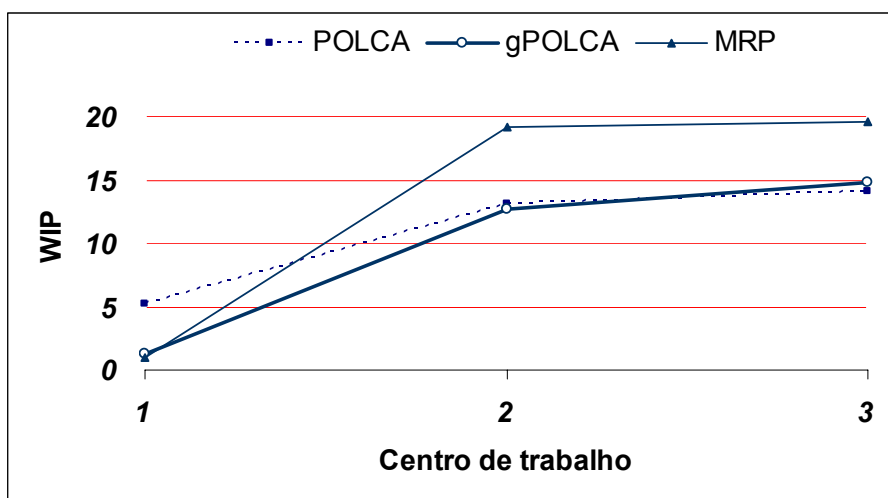


Figura 5.5: Localização do WIP.

5.5 Conclusões sumárias

Neste capítulo foi apresentado e testado o novo mecanismo gPOLCA de controlo da actividade de produção, com incidência tanto na fase de lançamento como na fase de controlo do fluxo de materiais no espaço fabril. O seu desempenho foi directamente comparado com o dos mecanismos POLCA, em que é baseado, e MRP. Foram

equacionadas medidas importantes de desempenho, nomeadamente o tempo de percurso por artigo, o trabalho em curso no espaço fabril e a taxa de produção, todas relacionadas pela Lei de Little.

Das experiências comparativas realizadas, mostrou-se evidência de que o mecanismo gPOLCA tem um desempenho melhor que os outros dois em ambiente de produção variável, do tipo multi-produto, característico do sector de produção por encomenda. Verificou-se, também, que o acréscimo de variabilidade na experiência, criada por desequilíbrio da mistura de artigos em fabrico e pela variabilidade nos seus tempos de processamento, tenderia deteriorar menos o desempenho do gPOLCA do que o desempenho dos outros dois mecanismos testados. Aparentemente, as qualidades do gPOLCA são realçadas, i.e. manifestam-se melhor, em ambientes produtivos de maior variabilidade.

Tendo em conta os resultados desta investigação e da investigação realizada por outros autores, que demonstrou poder o MRP desempenhar melhor que o TKS em ambiente variável de multi-produto, pode admitir-se ser o gPOLCA um mecanismo mais adequado para ambiente multi-produto de produção por encomenda do que o MRP, POLCA e TKS.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho apresentado nesta tese claramente evidencia a grande importância dos mecanismos de Controlo da Actividade de Produção (CAP) para o sucesso das empresas. Podem contribuir para um melhor desempenho, através de um melhor controlo do lançamento e do fluxo de materiais ao longo do sistema produtivo, quer este se encontre localizado ou distribuído num espaço regional ou global. Em particular, podem contribuir fortemente para garantir prazos de entrega reduzidos e entrega atempada dos produtos aos clientes. É de notar que um conjunto de estudos desenvolvidos na prática industrial, implementando mecanismos de CAP baseados em *workload control* (WLC), mostraram que podem ser alcançados bons resultados através do lançamento controlado de trabalhos para o espaço fabril. Contudo, a maioria dos estudos teóricos, essencialmente de simulação, conduziram a conclusões opostas, i.e. mostraram que é preferível lançar os trabalhos de imediato. Esta contradição é conhecida como paradoxo do WLC. Atendendo aos resultados promissores, resultantes da implementação dos mecanismos de WLC na prática industrial, e ao limitado conhecimento que se possui acerca do seu comportamento, decidiu-se nesta tese perseguir os seguintes objectivos:

- (1) aprofundar o conhecimento acerca do funcionamento dos mecanismos de WLC; e
- (2) estabelecer orientações práticas para a selecção de mecanismos adequados a situações concretas e particulares de produção.

Três questões principais guiaram o trabalho desenvolvido na tese:

1. Como desenvolver mecanismos de WLC *customizados* e adequados a situações produtivas específicas?
2. Como é que as estratégias de controlo e parâmetros de lançamento afectam o desempenho dos mecanismos WLC?
3. Como pode o desempenho dos mecanismos de WLC ser melhorado?

Na secção 6.1 são sumariadas as principais conclusões e contribuições da tese, relativamente a cada uma das questões acima mencionadas. As conclusões retiradas resultam do estudo efectuado nos capítulos anteriores. Na secção 6.2 é elaborado um conjunto de sugestões para investigação futura.

6.1 Conclusões

6.1.1 Mecanismos de WLC *customizados*

O WLC proporciona uma abordagem específica ao lançamento controlado de trabalhos para o espaço fabril, estabelecendo normas que limitam o WIP no espaço fabril ou em determinados grupos de capacidade. Embora existam diversas variantes e mecanismos de WLC, relativamente pouco se conhece acerca do seu comportamento em contextos produtivos específicos. O elevado número de aspectos necessários para descrever uma determinada situação produtiva, que torna as conclusões genéricas difíceis de aplicar, pode, em parte, explicar isto.

A revisão da literatura nesta área e o estudo realizado neste trabalho, principalmente no capítulo 4, permitem concluir que, uma vez que o comportamento dos mecanismos depende fortemente das condições de operação e controlo da produção consideradas, não é possível dizer existir um mecanismo de CAP que seja o melhor a efectuar as actividades de lançamento e controlo do fluxo de materiais. De facto, o comportamento dos mecanismos depende fortemente das condições de operação e controlo da produção consideradas, como as experiências de simulação realizadas no capítulo 4 o mostram.

No sentido de perceber a complexidade e a imensa variedade de mecanismos de CAP foi desenvolvido no capítulo 3 um modelo genérico conceptual capaz de configurar uma variedade de mecanismos de WLC. O modelo permite, ao contrário do que tem acontecido até à data, que a selecção dum mecanismo para uma particular situação

produtiva específica, não se restrinja à utilização das abordagens conhecidas que têm sido propostas na literatura. É possível, através da sua adequada parametrização, adaptá-lo a realidades ou instâncias industriais diferentes, podendo, desta forma, especificarem-se mecanismos adequados e orientados a situações concretas e particulares de produção. Isto é feito, optimizando o valor das normas de carga, a usar em cada um dos grupos de capacidade do modelo genérico.

Uma limitação do modelo proposto reside, contudo, na sua complexidade. Encontrar a solução óptima, como observado no capítulo 3, não é um problema fácil! Conclui-se, assim, que a investigação deve ser direccionada no sentido de restringir a procura a uma classe de mecanismos robustos, sub óptimos e fáceis de implementar.

Uma vertente importante da investigação realizada nesta tese foi, assim, direccionada para o estudo das principais dimensões dos mecanismos WLC, esperando, desta forma, alcançar uma melhor compreensão do potencial real de cada mecanismo. O objectivo foi estabelecer regras e linhas de orientação, para selecção das estratégias de controlo e parâmetros de lançamento a adoptar em contextos ou situações produtivas específicas. Os resultados obtidos são sumariados nas secções seguintes.

6.1.2 Influência das normas de carga

O objectivo principal do WLC é o controlo das filas de espera do espaço fabril, com o intuito de criar tempos de percurso estáveis e reduzidos, e conseqüentemente proporcionar datas de entrega realísticas, assegurando um bom uso dos recursos disponíveis. Isto é feito pelo lançamento controlado de trabalhos para o espaço fabril. Para este fim são estabelecidas normas que limitam a carga em cada um dos grupos de capacidade. Pela lei de Little, o WIP médio encontra-se directamente relacionado com o tempo médio de percurso, o que implica que, um WIP controlado e estável resultará em tempos de percurso, também, controlados e estáveis.

Uma vez que o WIP no espaço fabril funciona com um *buffer* que previne a paragem dos recursos, reduzir a carga sem a balancear pelos centros de trabalho, poderá resultar num incremento do tempo no sistema. Nas simulações realizadas no capítulo 4, a influência das normas de carga foi investigada pela medição do tempo no sistema e do tempo de percurso.

Os resultados obtidos mostram que as normas possuem uma importante influência no desempenho dos mecanismos de WLC. Normas restritivas resultam numa redução do tempo de percurso numa gama substancial de valores destas. Os melhores valores ou níveis das normas podem resultar em reduções do tempo de percurso até cerca de 42 por cento, comparativamente com uma situação de lançamento imediato. De facto, à medida que as normas se tornam mais restritivas, menos trabalhos são lançados para o espaço fabril, passando a aguardar na *pool*. Contudo, para normas particularmente restritivas, a carga na *pool* aumenta mais do que a carga no espaço fabril diminui, resultando num aumento substancialmente do tempo no sistema.

Os resultados obtidos mostram que é possível operar o sistema produtivo com menos WIP e tempos de percurso mais curtos, sem um incremento importante do tempo no sistema. Isto é particularmente importante, na medida em que muitas empresas procuram adiar a decisão de lançamento de trabalho para o espaço fabril, colocando a ênfase organizacional na flexibilidade. Permite, ainda, ajudar a compreender o paradoxo do WLC.

6.1.3 Influência das estratégias de controlo

Como observado no capítulo 3, os mecanismos de CAP são caracterizados por várias dimensões, as quais descrevem características e propriedades fundamentais destes. Em cada dimensão existem diferentes alternativas, ou estratégias que é possível adoptar. Assim, a metodologia de investigação seguida, baseou-se na hipótese de que a selecção de um mecanismo adequado a uma particular situação produtiva, pode ser efectuada pela identificação das estratégias de controlo a usar em cada uma das suas dimensões.

Neste sentido, foi realizado no capítulo 4 um conjunto de experiências de simulação, com o intuito de perceber em que medida as estratégias de controlo, afectam o desempenho dos mecanismos de WLC e possivelmente identificar as melhores estratégias. As estratégias estudadas estão relacionadas com as dimensões de controlo da carga e de contabilização da carga ao longo do tempo. As primeiras regulam a carga lançada para o espaço fabril, enquanto as segundas estabelecem o momento e a carga a afectar a cada centro de trabalho ou grupo de capacidade. Foram avaliadas três estratégias de controlo da carga, i.e. o controlo da carga por um limite superior, por um

limite inferior e por balanceamento, e duas estratégias de contabilização da carga ao longo do tempo, nomeadamente, a atemporal e a probabilística.

Uma vez que os mecanismos lidam de forma diferente com o fluxo de materiais, ou de trabalho, conjecturou-se que a configuração do sistema produtivo poderia influenciar, de forma diferente, o desempenho das estratégias de controlo e conseqüentemente, o desempenho dos mecanismos. Assim, as experiências realizadas envolveram, também, o estudo de diferentes configurações produtivas, nomeadamente: *job shop*, *flow shop* geral e *flow shop* pura.

As experiências mostraram que a estratégia de balanceamento da carga e a estratégia atemporal de contabilização da carga ao longo do tempo, apresentam bons resultados em qualquer das configurações produtivas testadas. Pelo contrário, a estratégia de controlo da carga por um limite inferior e a estratégia probabilística de contabilização da carga ao longo do tempo, nem sempre proporcionam formas eficientes de controlo. Enquanto o desempenho da estratégia de controlo da carga por um limite inferior parece melhorar à medida que o fluxo de trabalho se torna mais directo, i.e. em *flow shops*, o desempenho da estratégia probabilística deteriora-se significativamente nestas circunstâncias. De facto, o desempenho desta estratégia de contabilização da carga ao longo do tempo depende fortemente da configuração produtiva, tornando-se completamente inadequado em *flow shop* pura. Nesta configuração produtiva, a estratégia é incapaz de reduzir o tempo de percurso no espaço fabril.

Parece, portanto, ser apropriado que, em ambientes produtivos similares aos testados, os mecanismos de WLC possuam as seguintes características: (1) não imponham limites rígidos à carga nos centros de trabalho, i.e. lancem selectivamente os trabalhos para o espaço fabril, procurando minimizar o somatório dos desvios do balanceamento de carga de cada centro de trabalho; (2) façam uma contabilização atemporal da carga lançada para o espaço fabril, i.e. devem considerar que um trabalho que é lançado adiciona instantaneamente carga a todos os centros de trabalho do seu roteiro de fabrico. A carga de cada centro de trabalho, neste caso, deve ser corrigida da posição deste no roteiro de fabrico dos trabalhos usando, por exemplo, o método da carga ajustada proposto por Oosterman *et al.* (2000).

Um outro objectivo, do estudo realizado no capítulo 4, consistiu em investigar a robustez dos mecanismos a perturbações no sistema produtivo. Um mecanismo pode ter

um comportamento muito bom sob condições produtivas específicas, mas um comportamento completamente inadequado quando essas condições se alteram. Uma vez que as empresas podem operar em diferentes ambientes produtivos e as condições de operação se podem alterar ao longo do tempo, um mecanismo robusto a estas alterações pode traduzir-se numa importante vantagem competitiva. A este respeito, os resultados obtidos mostraram que o balanceamento da carga e a contabilização atemporal da carga ao longo do tempo são as estratégias mais robustas, i.e. menos sensíveis a perturbações no sistema produtivo, decorrentes de alteração na distribuição do intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema, na carga no sistema e na distribuição dos tempos de processamento. Como tal, será de prever melhores resultados com a implementação prática destas estratégias, mesmo em condições produtivas que não sejam exactamente as mesmas das testadas, do que com a implementação das outras estratégias testadas.

6.1.4 Influência dos parâmetros de lançamento

Nas experiências de simulação realizadas no capítulo 4 procurou-se, ainda, perceber o impacto dos parâmetros de lançamento, que vulgarmente são necessários especificar dentro do conceito WLC, no desempenho dos mecanismos. Os parâmetros estudados incluem o limite temporal, o qual restringe o conjunto de trabalhos que são considerados para lançamento e o período de libertação, que define o intervalo de tempo entre lançamentos.

Os resultados obtidos permitem concluir que os mecanismos, além de serem sensíveis aos valores das normas de carga, são também sensíveis a parâmetros como o limite temporal e o período de libertação. Aplicar um limite temporal finito, que significa que apenas os trabalhos da *pool* que têm datas planeadas de libertação dentro do período de tempo definido por esse limite são considerados para libertação, nem sempre é recomendável. De facto, se por um lado, pelo lançamento de trabalhos urgentes, um limite temporal finito contribui para reduzir os desvios entre as datas de conclusão e as datas de entrega prometidas, i.e. pode resultar na melhoria da entrega atempada; por outro, tende a reduzir as possibilidades de balanceamento, o que se traduz numa deterioração significativa do desempenho dos mecanismos, em termos do tempo que os trabalhos passam no sistema e desta forma impossibilitar o alcance de prazos de entrega

reduzidos. Usar um período de libertação mais longo, como mostrado pelas experiências realizadas, retarda os trabalhos na *pool*, contribuindo para aumentar o tempo no sistema. Um período demasiadamente curto pode, contudo, dificultar o lançamento de trabalhos com muitas operações e/ou com tempos de processamento elevados. Assim, a escolha deste parâmetro deve ser criteriosa e não, apenas, baseada em práticas industriais, como por exemplo em lançamentos diários ou semanais.

Os resultados sugerem, também, que os parâmetros de lançamento, i.e. o período de libertação e em particular o limite temporal, são mais sensíveis a perturbações no sistema produtivo, do que as estratégias de controlo da carga e de contabilização da carga ao longo do tempo. De facto, a escolha destes parâmetros é particularmente delicada, influenciando fortemente o desempenho dos mecanismos de WLC. Assim, aquando da implementação dos mecanismos na prática industrial, especial atenção deve ser atribuída à escolha dos valores dos parâmetros de lançamento.

6.1.5 Mecanismo gPOLCA

O mecanismo gPOLCA foi proposto no capítulo 5 com o objectivo de melhorar o desempenho dos mecanismos de WLC, particularmente em *flow shops*. O gPOLCA é um mecanismo baseado em cartões, que procura controlar as filas de espera do espaço fabril, com vista lançar atempadamente os trabalhos e, assim, respeitar as datas de entrega prometidas. O número restrito de cartões, atribuído a cada par de centros de trabalhos, limita o WIP no espaço fabril, garantindo tempos de percurso estáveis e controlados. Na prática o número de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho deve ser determinado. Este parâmetro controla a taxa de produção do sistema. Uma forma de estabelecer o número de cartões consiste em usar a simulação. Isto requer, contudo, um modelo de simulação validado, o qual pode não existir. Uma abordagem alternativa consiste, em operar o sistema produtivo durante um determinado período de tempo, com um número de cartões superior ao que parece ser o óptimo. De seguida o número de cartões deve ser gradualmente reduzido, monitorizando cuidadosamente os correspondentes, WIP e taxa de produção, até que um ponto desejado na curva taxa de produção vs. WIP seja alcançado.

Em *job shop* o gPOLCA pode, eventualmente, resultar num número elevado de malhas de controlo, à semelhança do que acontece no POLCA. Contudo, o número de cartões a atribuir a cada par de centros de trabalho pode, ser estimado com base no *lead time* do par como se referiu na secção 5.3.2, o que simplifica significativamente a sua aplicação. Uma simplificação adicional pode ser obtida implementando o gPOLCA como um sistema de cartões virtuais, por ser mais fácil manipular mesmo uma grande diversidade de tipos de cartões e malhas de controlo.

O gPOLCA foi comparado, via simulação, com outros mecanismos de controlo da actividade de produção, nomeadamente o POLCA e o MRP, num ambiente produtivo de elevada variabilidade e alterações na mistura de produtos. Neste ambiente produtivo o gPOLCA mostrou ter um desempenho superior ao dos outros mecanismos, assegurando a mesma taxa de produção com menor WIP e menor tempo de percurso. O mecanismo aparenta, também, ser mais robusto a alterações na mistura de produtos. Enquanto o desempenho de todos os mecanismos testados se deteriora em condições de maior variabilidade, o impacto destas variações é menor no mecanismo gPOLCA. Os benefícios do gPOLCA podem ser atribuídos ao facto de ser um mecanismo com uma estratégia *push* de controlo do fluxo de materiais e ao facto de manter um stock de cartões de autorização de produção a circular no espaço fabril, em vez de manter uma quantidade rígida de WIP em cada par de centros de trabalho ou células, como acontece com o POLCA.

O mecanismo gPOLCA de controlo da actividade de produção, não é certamente a melhor forma de controlar o lançamento e o fluxo de materiais em todos os ambientes produtivos, contudo, os resultados obtidos parecem mostrar que é particularmente adequado ao ambiente de produção por encomenda e ao mercado actual onde é possível encontrar uma procura crescente de produtos *customizados*.

Em conclusão, nesta tese foram investigadas três configurações produtivas: *job shop*; *flow shop* geral e *flow shop* pura. Eventualmente muitas configurações reais encontrar-se-ão entre estes extremos. Contudo, o conhecimento do comportamento dos parâmetros de lançamento e estratégias de controlo nestas configurações extremas, poderá ajudar à selecção do mecanismo de WLC que mais se adequa ao contexto produtivo específico em causa.

6.2 Trabalho futuro

Esta tese contribui para melhorar o conhecimento acerca do comportamento dos mecanismos de CAP baseados em WLC. Contudo, devido à elevada quantidade de factores que influenciam o comportamento destes mecanismos, é reconhecida a necessidade de investigação adicional. Assim, são sugeridas algumas direcções potencialmente relevantes para investigação futura:

- Análise estruturada do desempenho dos mecanismos de WLC num conjunto mais diversificado de situações produtivas, baseadas quer nas configurações produtivas estudadas, quer em novas configurações.
- Investigação adicional em abordagens emergentes, como gPOLCA, para confirmar a sua aplicabilidade e desempenho num conjunto alargado de situações produtivas, por via da simulação e também por via empírica, i.e. de aplicação em ambientes reais.
- Investigação empírica baseada em casos de estudo que valide os resultados obtidos através da simulação, deste e de outros trabalhos, proporcionando indicações práticas sobre o comportamento dos mecanismos, que possam ajudar a compreender o paradoxo do WLC que tem frustrado os investigadores desta área.
- Exploração do modelo genérico desenvolvido no capítulo 3 como instrumento de projecto e/ou investigação de novos mecanismos de WLC.
- Exploração de formas de combinar as tecnologias *web* com o WLC, como meio de integração deste último no contexto da gestão de *supply chains*.

Esta tese proporciona um ponto de partida. O foco foi colocado na decisão de lançamento. De facto, dentro do conceito WLC, a decisão de lançamento é crucial para controlar as filas de espera do espaço fabril, e assim criar tempos de percurso estáveis e reduzidos. As decisões de aceitação/rejeição e de ajuste de capacidade são também facilitadas pelo WLC, contudo, estas não foram abordadas na tese. A análise destas decisões e, em particular, da possibilidade de proceder a ajustes de capacidade deverá ser objecto de investigação num futuro próximo. Pretende-se, essencialmente, desenvolver modelos que possam ajudar a controlar o progresso e a execução das ordens de produção através do sistema produtivo, em função da capacidade estabelecida para um determinado período (curto) de tempo. De facto, em muitas unidades

produtivas é possível alterar a capacidade produtiva no curto ou imediato prazo, adaptando-a às variações da carga. Contudo, na maioria das vezes as decisões de alteração da capacidade não são tomadas continuamente, podendo apenas ser realizadas periodicamente. Assim, o foco da investigação deverá ser ao nível dos modelos que considerem a tomada periódica de decisão.

Bibliografia

AHMED, I.; FISHER, W. W. - Due date assignment, job order release and sequencing interaction in job shop scheduling. **Decision Sciences**. Vol. 23: n° 3 (1992), p. 633–646.

BAKER, C.T.; DZIELINKI, B. P. - Simulation of a simplified job shop. **Management Science**. Vol. 6: n°3 (1960), p.311-323.

BAKER, K. R. - **Introduction to sequencing and scheduling**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

BAKER, K. R. - The effects of input control on the performance of a simple scheduling model. **Journal of Operations Management**. Vol. 4: n°2 (1984), p. 99-112.

BECHTE, W. - Load-oriented manufacturing control just-in-time production for job shops. **Production Planning and Control**. Vol. 5: no. 3 (1994), p. 292-307.

BECHTE, W. – **Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung**. Dusseldorf: University Dusseldorf, 1980. Ph.D. Thesis.

BECHTE, W. - Theory and practice of load-oriented manufacturing control. **International Journal of Production Research**. Vol. 26: n°3 (1988), p. 375-395.

BERGAMASCHI, D.; CIGOLINI, R.; PERONA, M.; PORTIOLI, A. - Order review and release strategies in a job shop environment: a review and classification. **International Journal of Production Research**. Vol. 35: n°2 (1997), p. 339-420.

BERKLEY, B. J. - A review of the kanban production control research literature. **Production and Operations Management**. Vol.1: n° 4 (1992), p. 393-411.

BERTRAND, J. W. M.; Van OOIJEN, H. P. G. - Workload based order release and productivity: a missing link. **Production Planning and Control**. Vol. 13: n°7 (2002), p. 665-678.

BERTRAND, J. W. M.; WORTMAN, J. C. - **Production control and information systems for component-manufacturing shops**. North-Holland: Elsevier Science Publishers B.V., 1981.

BLACKSTONE, J. H.; PHILLIPS, D. T.; HOGG, G. L. - A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. **International Journal of Production Research**. Vol. 20: n°1 (1982), p. 27-45.

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. - A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, In Press.

BOBROWSKI, P. M. - Implementing a loading heuristic in a discrete release job shop. **International Journal of Production Research**. Vol. 27: n°11 (1989), p.1935–1948.

BONVIK, A. M.; COUCH, C. E.; GERSHWIN, S. B. - A comparison of production-line control mechanisms. **International Journal of Production Research**. Vol. 35: n°3 (1997), p. 789-804.

BREITHAUPT, J. W., LAND, J.; NYHUIS, P. - The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release. **Production Planning and Control**. Vol. 13: n°7 (2002), P. 625-638.

BUZACOTT, J. A - Queueing models of Kanban and MRP controlled production systems. **Engineering Cost and Production Economics**. Vol. 17: n°1-4 (1989), p. 3-20.

BUZACOTT, J. A.; SHANTIKUMAR, G. J. - A general approach for coordination production in multiple cell manufacturing systems. **Production and Operation Management**. Vol. 1: n°1(1992), p. 34-52.

BUZACOTT, J. A.; SHANTIKUMAR, G. J. - **Stochastic models of manufacturing systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

CIGOLINI, R.; PERONA, M.; PORTIOLI, A. - Comparison of order review and release techniques in a dynamic and uncertain job shop environment. **International Journal of Production Research**. Vol. 36: n°11 (1998), p. 2931-2951.

CIGOLINI, R.; PORTIOLI, A., - An experimental investigation on workload limiting methods within ORR policies in a job shop environment. **International Journal of Production Research**. Vol. 13: n°7 (2002), p. 602-613.

CLARK, A. J.; SCARF, H. - Optimal Policies for the Multi-Echelon Inventory Problem. **Management Science**. Vol. 6: n°4 (1960), p.475-490,

CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W. - **Theory of Scheduling**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing, 1967.

DALLERY Y.; LIBEROPOULOS G. - **A new kanban type pull control mechanism for multiple-stage manufacturing systems**. Proceedings of the 3rd European Control Conference. Rome, Italy: September, 1995.

ENNS, S. T. - An integrated system for controlling shop loading and work flow. **International Journal of Production Research**. Vol. 33: n° 10 (1995), p. 2801-2820.

FERNANDES, N. O.; SILVA S. C. - **A generic workload control model for order release and workflow control**. 18th International Conference on Production Research. Fisciano, Italy: July-August, 2005.

FERNANDES, N. O.; SILVA S. C. - Generic POLCA – a production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. **International Journal of Production Economics**. Vol. 104: n°1 (2006), p. 74-84.

FOWLER, J. W., HOGG, G. L.; MASON, S. J. - Workload control in the semiconductor industry. **Production Planning and Control**. Vol. 13: n°7 (2002), p. 568-578.

FRAMINAN, J. M.; GONZALES, P. L.; RUIZ-USANO, R. - The Conwip production control system: review and research issues. **Production Planning and Control**. Vol. 14: n°3 (2003), p. 255-265.

GARETTI, M.; POZZETTI, A.; BAREGGI, A. - On-line loading and dispatching in flexible manufacturing systems. **International Journal of Production Research**. Vol. 28: n°7 (1990), p. 1271-1292.

GAURY, E.; PIERREVAL, H.; KLEIJNEN, J. P. C. - An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, CONWIP and hybrid. **Journal of Intelligent Manufacturing**. Vol. 11: n°2 (2000), p. 157-167.

GLASSEY, C. R.; RESENDE, M. - Closed loop job release control for VLSI circuit manufacturing. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**. Vol. 1: n°1 (1988), p. 36-46.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. I. - **The Goal: a process of ongoing improvement**. New York: North River Press, 1984.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. - **The Race**. North River Press: New-York, 1986.

GRAVES, R. J.; KONOPKA, J. M.; MILNE, R. J. - Literature review of materials flow control mechanisms. **Production Planning and Control**. Vol. 6: n° 5 (1995), p. 395-403.

HALL, W. R. - Driving the productivity machine. **Production Planning and Control in Japan**. (Falls Church, Virginia) American Production and Inventory Control Society. 1981

HASKOSE, A.; KINGSMAN, B. G.; WORTHINGTON, D. - Modelling flow and jobbing as a queuing network for workload control. **International Journal of Production Economics**. Vol. 78: n° 3 (2002), p. 271-285.

HENDRY, L.; KINGSMAN, G. - A decision support system for job release in make-to-order companies. **International Journal of Operations and Production Management**. Vol. 11: n°6 (1991), p. 6-16.

HENDRY, L. - **A decision support system to manage delivery and manufacturing lead times in make to order companies**. UK: Lancaster University, 1989. Ph.D. Thesis.

HENDRY, L.; WONG, S. K. - Alternative order release mechanisms: a comparison by simulation. **International Journal of Production Research**. Vol. 32: n°12 (1994), p. 2827-2842.

HENRICH, P.; LAND, M.; GAALMAN, G. - Exploring applicability of the workload control Concept. **International Journal of Production Economics**. Vol. 90: n°2 (2004), p. 187-198.

HOEKSTRA, S. J.; ROMME, J. M. - **Integral logistics structures: developing customer-oriented goods flow**. New York: McGraw-Hill, 1992.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. - **Factory Physics: foundations of manufacturing management**. Boston: Irwin, 1996.

HUANG, C. C.; KUSIAK, A. - Manufacturing control with push and pull approach. **International Journal of Production Research**. Vol. 3: n°1 (1998), p. 151-275.

IRASTORZA, J. C.; DEANE, R. H. - A loading and balancing methodology for job shop control. **AIIE Transactions**. Vol. 6: n°4 (1974), p. 302-307.

KANET, J. J. - Load limited order release in job shop scheduling systems. **Journal of Operations Management**. Vol. 7: n°3 (1988), p. 44-58.

KANET, J. J.; HAYYA, J. C. - Priority dispatching with operations due dates in a job shop. **Journal of Operations Management**. Vol. 2: n°3 (1982), p. 167-175.

KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. - **Simulation with Arena**, 2nd ed. London: McGraw-Hill, 2001.

KIMBALL, G. - General principles of inventory control. **Journal of Manufacturing and Operations Management**. Vol. 1: n°1 (1988), p. 119-130.

KINGSMAN, B. G. - Modeling input-output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. **International Journal of Production Economics**. Vol. 13: n°7 (2000), p. 73-93.

KINGSMAN, B. G.; HENDRY, L. - The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in make to order companies. **Production Planning and Control**. Vol. 13: n° 7 (2002), p. 579–590.

KINGSMAN, B. G.; HENDRY, L.; MERCER, A.; SOUZA, A. - Responding to customer enquiries in make-to-order companies: Problems and solutions. **International Journal of Production Economics**. Vol. 46-47 (1996), p. 219-231.

KINGSMAN, B. G.; TATSIOPOULOS, I. P.; Hendry, L. C. - A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. **European Journal of Operations Research**. Vol. 40: n°21 (1989), p.196-209.

KOBAYASHI, H. - **Modelling and analysis: an introduction to system performance evaluation methodology**. New York: Addison-Wesley, 1978.

KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R.; VERNON, M. - Re-examining the performance of MRP and Kanban material control strategies for multi-product flexible manufacturing systems. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**. Vol. 16: n°2 (2004), p. 123-150.

LAMBRECHT, M.; SEGAERT, A. - Buffer stock allocation and assembly type production lines. **International Journal of Operations and Production Management**. Vol.10: n°2 (1990), p. 47-61.

LAND, M. - Parameters and sensitivity in workload control. **International Journal of Production Economics**. Vol. 104: n°2 (2006), p. 625-638.

LAND, M.; GAALMAN, G. - The performance of workload control concepts in job shops: Improving the release method. **International Journal of Production Economics**. Vol 56–57: n°20 (1998), p. 347–364.

LAND, M.; GAALMAN, G. - Workload control concepts in job shops a critical assessment, **International Journal of Production Economics**. Vol. 46-47 (1996), p. 535 548.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. - **Simulation modelling and analysis**. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 2000.

LINGAYAT, S.; MITTENTHAL, J.; O'KEEFE, R. M. - An order release mechanism for a flexible flow system. **International Journal of Production Research**. Vol. 33:

n°5 (1995), p. 1241-1256.

LITTLE, J. D. C. - A proof for the queuing formula: $L=\lambda W$. **Operations Research**. Vol. 9 (1961), p. 383-387.

MALHOTRA, M. K., JENSEN, J. B.; PHILIPOOM, P. R. - Management of vital customer priorities in job shop manufacturing environments. **Decision Sciences**. Vol. 25: n°5-6 (1994), p. 711-736.

MELNYK, S. A., DENZLER, D. R.; FREDENDALL, L. - Variance control vs. dispatching efficiency. **Production and Inventory Management**. Vol. 33 (1992), p. 6-13.

MELNYK, S. A.; RAGATZ, G. L. - Order review/release and its impact on the shop floor. **Production and Inventory Management**. Vol. 29: n°2 (1988), p. 13-17.

MELNYK, S. A.; RAGATZ, G. L. - Order review/release: research issues and perspectives. **International Journal of Production Research**. Vol. 27: n° 7 (1989), p. 1081-1096.

MELNYK, S. A.; RAGATZ, G. L.; FREDENDALL, L. - Load smoothing by the planning and order review/release systems: a simulation experiment. **Journal of Operations Management**. Vol. 10: n°4 (1991), p. 512-523.

MONDEN, Y. - **Toyota Production System**. Norcross GA: Industrial Engineering and Management Press, 1983.

MOORE, J. M.; WILSON, R. C. - A review of simulation research in job shop scheduling. **Production and Inventory Management**. Vol. 8: n°1 (1967), p. 1-10.

OLHAGER, J.; WIKNER, J. - Production planning and control tools. **Production Planning and Control**. Vol. 11: n°3 (2000), p. 210-222.

ONUR, L.; FABRYCKY, W. L. - An input/output control system for the dynamic job shop. **IIE Transactions**. Vol.19: n°1 (1987), p. 88-97.

OOSTERMAN, B.; LAND, M.; GAALMAN, G. - The influence of shop characteristics on workload control. **International Journal of Production Economics**. Vol. 68: n°1 (2000), p. 107-119.

ORLICKY, J. - **Materials Requirement Planning**. New York: McGraw-Hill, 1975.

PARK, C.; SONG, J.; KIM, J. G.; KIM, I. - Delivery date decision support system for the large scale make-to-order manufacturing companies: a Korean electric motor company case. **Production Planning and Control**. Vol. 10: n° 6 (1999), p. 585-597.

PHILIPOOM, P. R.; MALHOTRA, M. K.; JENSEN, J. B. - An evaluation of capacity sensitive order review and release procedures in job shops. **Decision Sciences**. Vol. 24: n° 6, (1993), p. 1109–1133.

PHILIPOOM, P. R.; FRY, T. D. - Capacity-based order review/ release strategies to improve shop performance. **International Journal of Production Research**. Vol. 30: n°1 (1992), p. 2559-2572.

PHILIPOOM, P. R.; MALHOTRA, M. K.; JENSEN, J. B., - An evaluation of capacity sensitive order review and release procedures in job shops. **Decision Sciences**. Vol. 24: n°6 (1993), p. 1109-1134.

PINEDO, M.; CHAO, X. - **Planning and Scheduling in Manufacturing and Services**. New York: Springer, 2005.

PLOSSL, G. W. - Throughput time control. **International Journal of Production Research**. Vol. 26: n°3 (1988), p. 493-499.

PLOSSL, G. W. - **Production and Inventory Control: principles and techniques**. 2nd ed. New Jersey: Prentice-hall, Englewood Cliffs, 1985

PLOSSL, G. W.; WIGHT, O. W. - Capacity planning and control. **Production and Inventory Management Journal**. Vol. 14: n°3 (1973), p. 31-67.

PORTIOLI, A. - **General bucket: A new release procedure for workload control**. 12th International Working Seminar on Production Economics. Innsbruck, Austria: February, 2002.

RAGATZ, G. L.; MABERT, V. A. - An evaluation of order release mechanism in job shop environment. **Decision Sciences**. Vol. 19: n°1 (1988), p. 167-189.

RAMASESH, R. - Dynamic Job shop scheduling: a survey of simulation research. **Omega**. Vol. 18: n° 1 (1990), p. 43-57.

RIEZEBOS, J. - Time bucket length and lot-splitting approach. **International Journal of Production Research**. Vol. 42: n°12 (2004), p. 2325-2338.

RIEZEBOS, J.; KORTE G. J.; Land, M. - Improving a practical DBR buffering approach using workload control. **International Journal of Production Research**. Vol. 41: n°4 (2003), p. 699-712.

RODERICK, L. M.; PHILLIPS, D. T.; HOGG, G. L. - A comparison of order release strategies in production control systems. **International Journal of Production Research**. Vol. 30: n°3 (1992), p. 611-626.

ROSE, O. – **CONLOAD: A new lot release rule for semiconductor wafer fabs**, Proceedings of the Winter Simulation Conference. Phoenix: December, 1999.

ROSS, P. J. - **Taguchi Techniques for Quality Engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design**. New York: McGraw-Hill, 1988.

SABUNCUOGLU, I.; KARAPINAR, H. Y. - Analysis of order review/release problems in production systems. **International Journal of Production Economics**. Vol. 62: n° 3 (1999), p. 259-279.

SALEGNA, G. J.; PARK, P. S. - Workload smoothing in a bottleneck job shop. **International Journal of Operations and Production Management**. Vol. 16: n°1 (1996), p. 91-110.

SCHONBERGER, R. J. - **Japanese Management Techniques: nine hidden lessons in simplicity**. New York: The Free Press, 1982.

SHIMOYASHIRO, S.; ISODA, K.; AWANE, H. - Input scheduling and load balance control for a job shop. **International Journal of Production Research**. Vol. 22: n°4 (1984), p. 597-605.

SO, K. C.; PINAULT, S. C. - Allocating buffer storages in a pull system. **International Journal of Production Research**. Vol. 15: n° 12 (1988), p. 879-894.

SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J. - Conwip: a pull alternative to Kanban. **International Journal of Production Research**. Vol. 28: n° 5 (1990), p. 879-894.

SPEARMAN, M. L.; ZAZANIS, M. A. - Push and pull production systems: issues and comparisons. **Operations Research**. Vol. 40: n° 3 (1992), p. 521-532.

STEVENSON, M.; HENDRY L. - **Improving supply chain integration using a workload control (WLC) concept and web functionality**, UK: Lancaster University, 2005b. Working paper 2005/55.

STEVENSON, M.; HENDRY, L. - Aggregated Load-oriented workload control: A review and re-classification of a key approach. **International Journal of Production Economics**. Vol.104 : n° 2 (2006), p. 676-693.

STEVENSON, M.; HENDRY, L.; KINGMAN, B. G. - A Review of Production Planning and Control (PPC): The Applicability of Key Concepts to the Make to Order (MTO) Industry. **International Journal of Production Research**. Vol. 43: n° 5 (2005a), p. 869-898.

SUGIMORI, Y.; KUSUNOKI, K.; CHO, F.; UCHIKAWA, S. - Toyota production system and Kanban system materialization of Just-In-Time and respect-for-Human system. **International Journal of Production Research**. Vol. 15: n° 6 (1977), p. 553-564.

SURI, R. - **Quick Response Manufacturing: a company-wide approach to lead time reduction**, Portland: Productivity Press, 1998.

SURI, R.; KRISHNAMURTHY, A. - **How to Plan and Implement POLCA: a material control system for high-variety or custom-engineered products**. Center for Quick Response Manufacturing. Madison: University of Wisconsin, 2003. Technical Report.

TAGUCHI, G.; CLAUSING, T. - Robust Quality. **Harvard Business Review**. Vol.68: n°1 (1990), p. 65-75.

TATSIPOULOS, I. P. - **A microcomputer-based interactive system for managing production and marketing in small component manufacturing firms using a hierarchical backlog control and lead time management technology**. UK: Lancaster University, 1983. Ph.D. Thesis.

TAYUR, S. R. - Structural properties and a heuristic for kanban-controlled serial lines. **Management Science**. Vol. 39: n° 11 (1993), p. 1347-1368.

VANDAELE, N.; CLAERHOUT, D.; van NIEUWENHUYSE; CREMMERTY, R. - **E-POLCA to control multi-product, multi-machine job shops**. Antwerp: UA Faculty of Applied Economics, 2005. Research paper.

WEIN, L. M. - Scheduling semiconductor wafer fabrication. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**. Vol. 1: n° 3 (1988), p. 115-129.

WELKER, G. A., VRIES, J.; WIJNGAARD, J. - **The influence of the customer order de-coupling point on the ordering process**, 11th International Annual EurOMA Conference: Operations Management as a Change Agent, INSEAD, Fontainebleau: June, 2004.

WIENDAHL, H. P. - **Load Oriented Manufacturing Control**, New York: Springer, 1995.

WIGHT, O. W. - Input/output control: a real handle on lead time. **Production and Inventory Management Journal**. Vol. 11: n° 3 (1970), p. 9-31.

WISNER, J. D. - A review of the order release policy research. **International Journal of Operations and Production Management**. Vol. 15: n°6 (1995), p. 25-40.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. - **Lean Thinking: banish waste and create wealth in your corporation**, New York: Simon & Schuster, 1996.

ZAPFEL, G.; MISSBAUER, H. - New concepts for production planning and control. **European Journal of Operational Research**. Vol. 67: n°3 (1993), p. 297–320.

Anexo A

Modelos de Simulação

A.1 Código SIMAN de um modelo de simulação usado no estudo do comportamento de mecanismos de WLC

PROJECT, "Job shop", "N.O. Fernandes" ,,No, Yes, Yes, Yes, No, No, No, No, No;

ATTRIBUTES: Attribute 1:

Atraso positivo:

Entry time:

Due date:

Jobtype:

d1:

d2:

d3:

d4:

d5:

d6:

Release date:

Atraso:

Position1:

Position2:

Position3:

Position4:

Position5:

Position6:

tp:

f1:

f2:

f3:

f4:

f5:

f6:

Release time;

VARIABLES: Process 4.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Dispose 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Decide 2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 2.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude");

Create 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

TWK(20),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),6,3,4,1,5,6,4,2,3,6,3,4,3,5,1,5,1,4,4,2:

Process 4.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude");

Process 6.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

early,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified");

Process 3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 2.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 4.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 6.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Decide 1.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 6.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"):
 factor,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),0.53:
 Matrizposition(20,6),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),4,1,0.0,0.0,5,5,1,0.0,0.0,2,0.0,3,0.0,
 2,1,5,0.0,0.0,2,2,1,0.0,1,0.0,2,1,3,1,1,6,2,1,1,3,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,6,2,2,0.0,0.0,6,2,0.0,0.0,1,3,4,2,5,0.0,
 2,0.0,1,0.0,0.0,2,0.0,4,0.0,1,3,0.0,0.0,3,4,0.0,0.0,0.0,1,0.0,1,1,2,1,1,5,3,3,1,3,2,0.0,0.0,2,3,0.0,0.0,0.0,4,0.0,
 4,0.0,4,4,0.0,3,0.0,0.0,0.0,4,4,4,2,0.0,5,1,2,3,0.0,0.0,3,0.0,3,3,0.0:
 Process 1.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"):
 Matriz(20,6),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),1,1,0.0,0.0,1,1,1,0.0,0.0,1,0.0,1,0.0,1,1,1,
 0.0,0.0,1,1,1,0.0,1,0.0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,1,1,1,0.0,0.0,1,1,0.0,0.0,1,1,1,1,0.0,1,0.0,
 1,0.0,0.0,1,0.0,1,0.0,1,1,0.0,0.0,1,1,0.0,0.0,0.0,1,0.0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0.0,0.0,1,1,0.0,0.0,0.0,1,0.0,1,0.0,
 1,1,0.0,1,0.0,0.0,0.0,1,1,1,0.0,1,1,1,1,0.0,0.0,1,0.0,1,1,0.0:
 Create 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 3.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"):
 Process 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 5.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Decide 2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Dispose 3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 dWIP1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 dWIP2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 dWIP3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 dWIP4,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 dWIP5,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 ub,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),15:
 dWIP6,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 WIP,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP1,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP2,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP3,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP4,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP5,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 uWIP6,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 Process 5.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude"):
 Decide 1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 late,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 WIPTotal,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"):
 Process 1.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 3.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude"):
 Process 5.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

QUEUES: Pool,LVF(Release date),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 5.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 6.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 1.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 2.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 3.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Process 4.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,);

RESOURCES: Resource
 1,Capacity(1),,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):

Resource 2,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Resource 3,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Resource 4,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Resource 5,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Resource 6,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban12,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban13,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban14,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban15,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban16,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban23,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban24,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban25,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban26,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban34,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban35,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban36,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban45,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban46,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):
 Kanban56,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,AUTOSTATS(Yes,,):

STATIONS: Enter 6.Station,,,Enter 6.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 5.Station,,,Enter 5.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 4.Station,,,Enter 4.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 3.Station,,,Enter 3.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Saida,,,Saida,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 2.Station,,,Enter 2.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 1.Station,,,Enter 1.Station,AUTOSTATS(Yes,,):

SEQUENCES: S10,Enter 3.Station&Enter 1.Station&Enter 5.Station&Enter 4.Station&Enter
 6.Station&Enter 2.Station&Saida:
 S11,Enter 6.Station&Enter 2.Station&Enter 3.Station&Saida:
 S12,Enter 2.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 6.Station&Enter 1.Station&Enter 3.Station&Saida:
 S13,Enter 2.Station&Enter 3.Station&Enter 6.Station&Saida:
 S14,Enter 4.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 1.Station&Enter 2.Station&Enter 5.Station&Enter
 3.Station&Saida:
 S15,Enter 1.Station&Saida:
 S16,Enter 4.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 3.Station&Enter 6.Station&Enter 5.Station&Enter
 1.Station&Saida:
 S17,Enter 4.Station,,,,Attribute 1=1&Saida:
 S18,Enter 3.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 4.Station&Enter 6.Station&Enter 5.Station&Saida:
 S19,Enter 4.Station&Enter 1.Station&Enter 6.Station&Enter 5.Station&Saida:
 S20,Enter 4.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 1.Station&Saida:
 S1,Enter 2.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 4.Station&Enter 6.Station&Enter 1.Station&Enter
 5.Station&
 Enter 3.Station&Saida:
 S2,Enter 1.Station,,,,tp=0&Enter 3.Station&Enter 5.Station&Saida:
 S3,Enter 2.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 3.Station&Enter 5.Station&Enter 4.Station&Saida:
 S4,Enter 5.Station&Saida:
 S5,Enter 4.Station&Enter 2.Station&Enter 5.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 6.Station&Enter
 1.Station&Saida:
 S6,Enter 2.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 5.Station&Enter 4.Station&Enter 6.Station&Enter
 1.Station&
 Enter 3.Station&Saida:
 S7,Enter 1.Station&Enter 3.Station,,,,Attribute 1=1&Enter 2.Station&Enter 6.Station&Saida:
 S8,Enter 2.Station&Enter 6.Station&Saida:
 S9,Enter 2.Station&Enter 5.Station&Enter 4.Station&Saida;

TALLIES: Time in System,"TS LOOR u",DATABASE(,"User Specified",):

```

lateness,,DATABASE("Expression","User Specified","lateness"):
tardiness,,DATABASE("Expression","User Specified","tardiness"):
flowtime,"FT LOOR u",DATABASE("Interval","User Specified","flowtime"):
Total flowtime,,DATABASE("Interval","User Specified","Total flowtime");

DSTATS:    wip,Work In Process,"",DATABASE("Time Persistent","User Specified","Work In
Process"):
           WIPTotal,Total WIP,"",DATABASE("Time Persistent","User Specified","Total WIP");

OUTPUTS:   TSTD(lateness),"",STD lateness,DATABASE("Output","User Specified","STD
lateness"):
           TAVG(tardiness),"",AVG tardiness,DATABASE("Output","User Specified","AVG tardiness"):
           late/(late+early)*100,"",Percente Tardy,DATABASE("Output","User Specified","Percente
Tardy");

REPLICATE,
90,,MinutesToBaseTime(27600),Yes,Yes,MinutesToBaseTime(9600),,,24,Minutes,No,No,, Yes;

ENTITIES:   Entity 1,Picture.Report,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,AUTOSTATS(Yes,,);

SETS:      SequenceSet,S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7,S8,S9,S10,S11,S12,S13,S14,S15,S16,S17,S18,S19,S20;

ACTIVITYAREAS: Enter 6.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Enter 5.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Enter 4.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Enter 3.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Saida,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Enter 2.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
               Enter 1.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
;
;
;
;   Model statements for module: Create 1
;
43$    CREATE,    1,MinutesToBaseTime(0.0),Entity
1:MinutesToBaseTime(EXPO(0.666)):NEXT(44$);

44$    ASSIGN:    Create 1.NumberOut=Create 1.NumberOut + 1:NEXT(16$);
;
;
;   Model statements for module: Assign 24
;
16$    ASSIGN:    Jobtype=
               DISC(0.05,1, 0.1,2, 0.15,3, 0.2,4, 0.25,5, 0.3,6, 0.35,7, 0.4,8, 0.45,9, 0.5,10, 0.55,11,
0.6,12, 0.65,13, 0.7,14, 0.75,15, 0.8,16, 0.85,17, 0.9,18, 0.95,19, 1.0,20):
               Due date=TNOW+UNIF(50.8,60.8):
               Entity.Sequence=SequenceSet(jobtype):
               Entry time=TNOW:
               WIPTotal=WIPTotal+1:
               Release date=Due date - TWK(jobtype)*7.2:
               f1=Matriz(jobtype, 1):
               f2=Matriz(jobtype, 2):
               f3=Matriz(jobtype, 3):
               f4=Matriz(jobtype, 4):
               f5=Matriz(jobtype, 5):
               f6=Matriz(jobtype, 6):
               Position1=MatrizPosition(jobtype, 1):
               Position2=MatrizPosition(jobtype, 2):
               Position3=MatrizPosition(jobtype, 3):

```

```

Position4=MatrizPosition(jobtype, 4):
Position5=MatrizPosition(jobtype, 5):
Position6=MatrizPosition(jobtype, 6):
d1=f1*factor**(position1-1):
d2=f2*factor**(position2-1):
d3=f3*factor**(position3-1):
d4=f4*factor**(position4-1):
d5=f5*factor**(position5-1):
d6=f6*factor**(position6-1):NEXT(26$);
;
;
;
; Model statements for module: Hold 1
;
;
26$    QUEUE,    Pool;
      WAIT:    1001:NEXT(42$);
;
;
;
; Model statements for module: Decide 2
;
;
42$    BRANCH,    1: If, (Release date <=
TNOW+16).and.((f1*(uWIP1+d1+dWIP1)<ub).and.(f2*(uWIP2+d2+dWIP2)<ub).and.(f3*(uWIP3+d3+
dWIP3)<ub).and.(f4*(uWIP4+d4+dWIP4)<ub).and.(f5*(uWIP5+d5+dWIP5)<ub).and.(f6*(uWIP6+d6+d
WIP6)<ub)),
      47$,Yes:
      Else,48$,Yes;
47$    ASSIGN:    Decide 2.NumberOut True=Decide 2.NumberOut True + 1:NEXT(36$);
48$    ASSIGN:    Decide 2.NumberOut False=Decide 2.NumberOut False + 1:NEXT(26$);
;
;
;
; Model statements for module: Assign 39
;
;
36$    ASSIGN:    WIP=WIP+1:
      Release time=TNOW:
      uWIP1=uWIP1+d1:
      uWIP2=uWIP2+d2:
      uWIP3=uWIP3+d3:
      uWIP4=uWIP4+d4:
      uWIP5=uWIP5+d5:
      uWIP6=uWIP6+d6:NEXT(19$);
;
;
;
; Model statements for module: Route 3
;
;
19$    ROUTE:    0.,SEQ;
;
;
;
; Model statements for module: Enter 4
;
;
2$     STATION,    Enter 1.Station;
49$    DELAY:    0.0000000000000000.,VA:NEXT(55$);
55$    DELAY:    0.000.,VA:NEXT(29$);
;
;
;
; Model statements for module: Assign 27
;
;
29$    ASSIGN:    dWIP1=dWIP1+1:
      uWIP1=uWIP1-1:
      f1=0:NEXT(0$);

```

```

;
;
;
; Model statements for module: Process 1
;
0$    ASSIGN:    Process 1.NumberIn=Process 1.NumberIn + 1:
          Process 1.WIP=Process 1.WIP+1;
63$    QUEUE,    Process 1.Queue;
62$    SEIZE,    2,VA:
          Resource 1,1:NEXT(61$);
61$    DELAY:    ERLA( 0.5, 2),,VA;
60$    RELEASE:  Resource 1,1;
108$   ASSIGN:    Process 1.NumberOut=Process 1.NumberOut + 1:
          Process 1.WIP=Process 1.WIP-1:NEXT(35$);
;
;
;
; Model statements for module: Assign 33
;
35$    ASSIGN:    dWIP1=dWIP1-1:
          uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):
          uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
          uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
          uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
          uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
          uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
;
; Model statements for module: Route 2
;
1$     ROUTE:    0,,SEQ;
;
;
;
; Model statements for module: Enter 5
;
4$     STATION,  Enter 2.Station;
111$   DELAY:    0.0000000000000000,,VA:NEXT(117$);

117$   DELAY:    0.000,,VA:NEXT(30$);

;
;
;
; Model statements for module: Assign 28
;
30$    ASSIGN:    dWIP2=dWIP2+1:
          uWIP2=uWIP2-1:
          f2=0:NEXT(3$);
;
;
;
; Model statements for module: Process 2
;
3$     ASSIGN:    Process 2.NumberIn=Process 2.NumberIn + 1:
          Process 2.WIP=Process 2.WIP+1;
125$   QUEUE,    Process 2.Queue;

```

```

124$ SEIZE, 2,VA:
      Resource 2,1:NEXT(123$);
123$ DELAY: ERLA( 0.5, 2),,VA;
122$ RELEASE: Resource 2,1;
170$ ASSIGN: Process 2.NumberOut=Process 2.NumberOut + 1:
      Process 2.WIP=Process 2.WIP-1:NEXT(37$);
;
;
; Model statements for module: Assign 49
;
37$ ASSIGN: dWIP2=dWIP2-1:
      uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):
      uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
      uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
      uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
      uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
      uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
; Model statements for module: Enter 6
;
6$ STATION, Enter 3.Station;
173$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(179$);

179$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(31$);
;
;
; Model statements for module: Assign 29
;
31$ ASSIGN: dWIP3=dWIP3+1:
      uWIP3=uWIP3-1:
      f3=0:NEXT(5$);
;
;
; Model statements for module: Process 3
;
5$ ASSIGN: Process 3.NumberIn=Process 3.NumberIn + 1:
      Process 3.WIP=Process 3.WIP+1;
187$ QUEUE, Process 3.Queue;
186$ SEIZE, 2,VA:
      Resource 3,1:NEXT(185$);
185$ DELAY: ERLA( 0.5, 2),,VA;
184$ RELEASE: Resource 3,1;
232$ ASSIGN: Process 3.NumberOut=Process 3.NumberOut + 1:
      Process 3.WIP=Process 3.WIP-1:NEXT(38$);
;
;
; Model statements for module: Assign 50
;
38$ ASSIGN: dWIP3=dWIP3-1:
      uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):

```

```

uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
;
; Model statements for module: Enter 7
;
;
8$ STATION, Enter 4.Station;
235$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(241$);
241$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(32$);
;
;
;
; Model statements for module: Assign 30
;
;
32$ ASSIGN: dWIP4=dWIP4+1:
uWIP4=uWIP4-1:
f4=0:NEXT(7$);
;
;
;
; Model statements for module: Process 4
;
;
7$ ASSIGN: Process 4.NumberIn=Process 4.NumberIn + 1:
Process 4.WIP=Process 4.WIP+1;
249$ QUEUE, Process 4.Queue;
248$ SEIZE, 2,VA:
Resource 4,1:NEXT(247$);

247$ DELAY: ERLA( 0.5, 2),,VA;
246$ RELEASE: Resource 4,1;
294$ ASSIGN: Process 4.NumberOut=Process 4.NumberOut + 1:
Process 4.WIP=Process 4.WIP-1:NEXT(39$);
;
;
;
; Model statements for module: Assign 51
;
;
39$ ASSIGN: dWIP4=dWIP4-1:
uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):
uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
;
; Model statements for module: Enter 8
;
;

```

```

10$ STATION, Enter 5.Station;
297$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(303$);
303$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(33$);
;
;
; Model statements for module: Assign 31
;
33$ ASSIGN: dWIP5=dWIP5+1:
          uWIP5=uWIP5-1:
          f5=0:NEXT(9$);
;
;
; Model statements for module: Process 5
;
9$ ASSIGN: Process 5.NumberIn=Process 5.NumberIn + 1:
          Process 5.WIP=Process 5.WIP+1;
311$ QUEUE, Process 5.Queue;
310$ SEIZE, 2,VA:
          Resource 5,1:NEXT(309$);
309$ DELAY: ERLA( 0.5, 2),,VA;
308$ RELEASE: Resource 5,1;
356$ ASSIGN: Process 5.NumberOut=Process 5.NumberOut + 1:
          Process 5.WIP=Process 5.WIP-1:NEXT(40$);
;
;
; Model statements for module: Assign 52
;
40$ ASSIGN: dWIP5=dWIP5-1:
          uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):
          uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
          uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
          uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
          uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
          uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
; Model statements for module: Enter 9
;
12$ STATION, Enter 6.Station;
359$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(365$);
365$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(34$);
;
;
; Model statements for module: Assign 32
;
34$ ASSIGN: dWIP6=dWIP6+1:
          uWIP6=uWIP6-1:
          f6=0:NEXT(11$);
;
;
; Model statements for module: Process 6
;
11$ ASSIGN: Process 6.NumberIn=Process 6.NumberIn + 1:

```

```

        Process 6.WIP=Process 6.WIP+1;
373$   QUEUE,    Process 6.Queue;
372$   SEIZE,    2,VA:
        Resource 6,1:NEXT(371$);
371$   DELAY:    ERLA( 0.5, 2),,VA;
370$   RELEASE:  Resource 6,1;
418$   ASSIGN:   Process 6.NumberOut=Process 6.NumberOut + 1:
        Process 6.WIP=Process 6.WIP-1:NEXT(41$);
;
;
;   Model statements for module: Assign 53
;
41$   ASSIGN:    dWIP6=dWIP6-1:
        uWIP1=uWIP1+f1*factor**(position1-entity.jobstep-1)-f1*factor**(position1-
entity.jobstep):
        uWIP2=uWIP2+f2*factor**(position2-entity.jobstep-1)-f2*factor**(position2-
entity.jobstep):
        uWIP3=uWIP3+f3*factor**(position3-entity.jobstep-1)-f3*factor**(position3-
entity.jobstep):
        uWIP4=uWIP4+f4*factor**(position4-entity.jobstep-1)-f4*factor**(position4-
entity.jobstep):
        uWIP5=uWIP5+f5*factor**(position5-entity.jobstep-1)-f5*factor**(position5-
entity.jobstep):
        uWIP6=uWIP6+f6*factor**(position6-entity.jobstep-1)-f6*factor**(position6-
entity.jobstep):NEXT(1$);
;
;
;   Model statements for module: Enter 10
;
13$   STATION,   Saida;
421$   DELAY:    0.0000000000000000,,VA:NEXT(427$);
427$   DELAY:    0.000,,VA:NEXT(15$);
;
;
;   Model statements for module: Assign 22
;
15$   ASSIGN:    WIP=WIP-1:
        WIPTotal=WIPTotal-1:
        Atraso=TNOW-due date:
        Atraso positivo=MX(0,atraso):NEXT(17$);
;
;
;   Model statements for module: Record 1
;
17$   TALLY:    flowtime,INT(Release time),1:NEXT(18$);
;
;
;   Model statements for module: Record 2
;
18$   TALLY:    Total flowtime,INT(Entry time),1:NEXT(20$);
;
;
;   Model statements for module: Record 4
;
20$   TALLY:    lateness,atraso,1:NEXT(28$);
;
;
;   Model statements for module: Record 6
;

```

```

28$    TALLY:    tardiness,atraso positivo,1:NEXT(21$);
;
;
;
; Model statements for module: Decide 1
;
;
21$    BRANCH,    1:
        If,Atraso<=0,432$,Yes:
        Else,433$,Yes;
432$    ASSIGN:    Decide 1.NumberOut True=Decide 1.NumberOut True + 1:NEXT(23$);
433$    ASSIGN:    Decide 1.NumberOut False=Decide 1.NumberOut False + 1:NEXT(22$);
;
;
; Model statements for module: Assign 26
;
;
23$    ASSIGN:    early=early+1:NEXT(14$);
;
;
; Model statements for module: Dispose 2
;
;
14$    ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
434$    DISPOSE:    Yes;
;
;
; Model statements for module: Assign 25
;
;
22$    ASSIGN:    late=late+1:NEXT(14$);
;
;
; Model statements for module: Create 2
;
;
435$    CREATE,    1,MinutesToBaseTime(0.0),Entity 1:MinutesToBaseTime(8):NEXT(436$);
436$    ASSIGN:    Create 2.NumberOut=Create 2.NumberOut + 1:NEXT(24$);
;
;
; Model statements for module: Signal 1
;
;
24$    SIGNAL:    1001:NEXT(25$);
;
;
; Model statements for module: Dispose 3
;
;
25$    ASSIGN:    Dispose 3.NumberOut=Dispose 3.NumberOut + 1;
439$    DISPOSE:    Yes;

```

A.2 Código SIMAN de um modelo de simulação usado na avaliação do gPOLCA

PROJECT, "Flow shop", "N.O. Fernandes",,,No,Yes,No,Yes,No,No,Yes,No,No;

ATTRIBUTES: TimeIN:

TempoP:

Jobtype;

VARIABLES: Dispose 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Decide 2.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.WaitTime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 3.WaitTime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Create 8.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 2.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude");

tempo2(7),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),1,1,1,1,1,1,0.75:

Dia,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified");

Process 3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 2.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Dispose 1.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 2.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Decide 1.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude");

Process 2.WaitTime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 3.WIP,CLEAR(System),CATEGORY("Exclude-Exclude");

Process 2.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Decide 2.NumberOut True,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

tempo(7),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified"),1,1,1,1,1,1,1.5:

prob(7),CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User

Specified"),50,50,50,50,50,50,33.333:

WIP,CLEAR(System),CATEGORY("User Specified-User Specified");

Create 3.NumberOut,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 3.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Decide 1.NumberOut False,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 3.NumberIn,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

Process 1.VATime,CLEAR(Statistics),CATEGORY("Exclude");

QUEUES: Buffer 1,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

Buffer 2,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

Process 1.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

Process 2.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,):

Process 3.Queue,FIFO,,AUTOSTATS(Yes,,);

RESOURCES: Resource

1,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,,AUTOSTATS(Yes,,):

Resource 2,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,,AUTOSTATS(Yes,,):

Resource 3,Capacity(1),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,,AUTOSTATS(Yes,,):

POLCA1,Capacity(30),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,,AUTOSTATS(Yes,,):

POLCA2,Capacity(50),,,COST(0.0,0.0,0.0),CATEGORY(Resources),,,AUTOSTATS(Yes,,);

STATIONS: Enter 4.Station,,,Enter 4.Station,AUTOSTATS(Yes,,):

Enter 3.Station,,,Enter 3.Station,AUTOSTATS(Yes,,):

Enter 2.Station,,Enter 2.Station,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 1.Station,,Enter 1.Station,AUTOSTATS(Yes,,):

TALLIES: Process 1.WaitTimePerEntity,,DATABASE("Wait Time Per Entity","Process","Process 1"):

Process 3.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 3"):
 Process 1.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 1"):
 Process 2.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 2"):
 Process 2.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 2"):
 Process 2.WaitTimePerEntity,,DATABASE("Wait Time Per Entity","Process","Process 2"):
 Process 3.VATimePerEntity,,DATABASE("VA Time Per Entity","Process","Process 3"):
 Process 1.TotalTimePerEntity,,DATABASE("Total Time Per Entity","Process","Process 1"):
 TP,"GPOLCA TP",DATABASE("Between","User Specified","TP"):
 Process 3.WaitTimePerEntity,,DATABASE("Wait Time Per Entity","Process","Process 3"):
 flowtime,"GPOLCA F",DATABASE("Interval","User Specified","flowtime");

DSTATS: WIP,work in process,"",DATABASE("Time Persistent","User Specified","work in process");

OUTPUTS: Process 1.WaitTime,,Process 1 Accum Wait Time,DATABASE("Accum Wait Time","Process","Process 1"):

Process 3.WaitTime,,Process 3 Accum Wait Time,DATABASE("Accum Wait Time","Process","Process 3"):
 Process 1.NumberOut,,Process 1 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 1"):
 Process 3.NumberOut,,Process 3 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 3"):
 Process 2.VATime,,Process 2 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 2"):
 Process 2.NumberIn,,Process 2 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 2"):
 Process 2.WaitTime,,Process 2 Accum Wait Time,DATABASE("Accum Wait Time","Process","Process 2"):
 Process 2.NumberOut,,Process 2 Number Out,DATABASE("Number Out","Process","Process 2"):
 Process 3.VATime,,Process 3 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 3"):
 Process 1.NumberIn,,Process 1 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 1"):
 Process 3.NumberIn,,Process 3 Number In,DATABASE("Number In","Process","Process 3"):
 Process 1.VATime,,Process 1 Accum VA Time,DATABASE("Accum VA Time","Process","Process 1");

REPLICATE,
 50,,MinutesToBaseTime(96000),Yes,Yes,MinutesToBaseTime(9600),,,24,Minutes,No,No,,Yes;

ENTITIES: Entity 1,Picture.Report,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,AUTOSTATS(Yes,,);

ACTIVITYAREAS: Enter 4.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):

Enter 3.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 2.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):
 Enter 1.Station,0,,AUTOSTATS(Yes,,):

;
 ;
 ;
 ;
 ;
 ;
 ;
 ;
 ;
 ;

Model statements for module: Enter 1

0\$ STATION, Enter 1.Station;
 30\$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(36\$);
 36\$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(1\$);

```

; Model statements for module: Process 1
;
1$ ASSIGN: Process 1.NumberIn=Process 1.NumberIn + 1:
        Process 1.WIP=Process 1.WIP+1;
70$ STACK, 1:Save:NEXT(44$);
44$ QUEUE, Process 1.Queue;
43$ SEIZE, 2,VA:
        Resource 1,1:NEXT(42$);
42$ DELAY: EXPO(TempoP),,VA:NEXT(85$);
85$ ASSIGN: Process 1.WaitTime=Process 1.WaitTime + Diff.WaitTime;
49$ TALLY: Process 1.WaitTimePerEntity,Diff.WaitTime,1;
51$ TALLY: Process 1.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
75$ ASSIGN: Process 1.VATime=Process 1.VATime + Diff.VATime;
76$ TALLY: Process 1.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
41$ RELEASE: Resource 1,1;
90$ STACK, 1:Destroy:NEXT(89$);
89$ ASSIGN: Process 1.NumberOut=Process 1.NumberOut + 1:
        Process 1.WIP=Process 1.WIP-1:NEXT(9$);
;
;
; Model statements for module: Route 2
;
9$ ROUTE: 0.000000000000000,Enter 2.Station;
;
;
; Model statements for module: Enter 2
;
2$ STATION, Enter 2.Station;
92$ DELAY: 0.000000000000000,,VA:NEXT(98$);
98$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(3$);
;
;
; Model statements for module: Process 2
;
3$ ASSIGN: Process 2.NumberIn=Process 2.NumberIn + 1:
        Process 2.WIP=Process 2.WIP+1;
132$ STACK, 1:Save:NEXT(106$);
106$ QUEUE, Process 2.Queue;
105$ SEIZE, 2,VA:
        Resource 2,1:NEXT(104$);
104$ DELAY: EXPO(TempoP),,VA:NEXT(147$);
147$ ASSIGN: Process 2.WaitTime=Process 2.WaitTime + Diff.WaitTime;
111$ TALLY: Process 2.WaitTimePerEntity,Diff.WaitTime,1;
113$ TALLY: Process 2.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
137$ ASSIGN: Process 2.VATime=Process 2.VATime + Diff.VATime;
138$ TALLY: Process 2.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
103$ RELEASE: Resource 2,1;
152$ STACK, 1:Destroy:NEXT(151$);
151$ ASSIGN: Process 2.NumberOut=Process 2.NumberOut + 1:
        Process 2.WIP=Process 2.WIP-1:NEXT(17$);
17$ RELEASE: POLCA1,1:NEXT(10$);
;
;
; Model statements for module: Route 3
;
10$ ROUTE: 0.000000000000000,Enter 3.Station;
;
;
; Model statements for module: Enter 3

```

```

;
4$ STATION, Enter 3.Station;
154$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(160$);
160$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(5$);
;
;
; Model statements for module: Process 3
;
5$ ASSIGN: Process 3.NumberIn=Process 3.NumberIn + 1;
        Process 3.WIP=Process 3.WIP+1;
194$ STACK, 1:Save:NEXT(168$);
168$ QUEUE, Process 3.Queue;
167$ SEIZE, 2,VA:
        Resource 3,1:NEXT(166$);
166$ DELAY: EXPO(TempoP),,VA:NEXT(209$);
209$ ASSIGN: Process 3.WaitTime=Process 3.WaitTime + Diff.WaitTime;
173$ TALLY: Process 3.WaitTimePerEntity,Diff.WaitTime,1;
175$ TALLY: Process 3.TotalTimePerEntity,Diff.StartTime,1;
199$ ASSIGN: Process 3.VATime=Process 3.VATime + Diff.VATime;
200$ TALLY: Process 3.VATimePerEntity,Diff.VATime,1;
165$ RELEASE: Resource 3,1;
214$ STACK, 1:Destroy:NEXT(213$);
213$ ASSIGN: Process 3.NumberOut=Process 3.NumberOut + 1;
        Process 3.WIP=Process 3.WIP-1:NEXT(7$);
7$ RELEASE: POLCA2,1:NEXT(11$);
;
;
; Model statements for module: Route 4
;
11$ ROUTE: 0.0000000000000000,Enter 4.Station;
;
;
; Model statements for module: Enter 4
;
6$ STATION, Enter 4.Station;
216$ DELAY: 0.0000000000000000,,VA:NEXT(222$);
222$ DELAY: 0.000,,VA:NEXT(13$);
;
;
; Model statements for module: Record 3
;
13$ TALLY: flowtime,INT(TimeIN),1:NEXT(14$);
;
;
; Model statements for module: Record 4
;
14$ TALLY: TP,BET,1:NEXT(12$);
;
;
; Model statements for module: Assign 2
;
12$ ASSIGN: WIP=WIP-1:NEXT(8$);
;
;
; Model statements for module: Dispose 1
;
8$ ASSIGN: Dispose 1.NumberOut=Dispose 1.NumberOut + 1;
227$ DISPOSE: Yes;
;

```

```

;
; Model statements for module: Create 3
;
228$ CREATE, 1,MinutesToBaseTime(20),Entity
1:MinutesToBaseTime(EXPO(1.111)):NEXT(229$);
229$ ASSIGN: Create 3.NumberOut=Create 3.NumberOut + 1:NEXT(29$);
;
;
; Model statements for module: Decide 2
;
29$ BRANCH, 1:
With,prob(dia)/100,232$,Yes:
Else,233$,Yes;
232$ ASSIGN: Decide 2.NumberOut True=Decide 2.NumberOut True + 1:NEXT(16$);
233$ ASSIGN: Decide 2.NumberOut False=Decide 2.NumberOut False + 1:NEXT(15$);
16$ SEIZE, 1,Other:
POLCA2,1:
POLCA1,1:NEXT(23$);
23$ QUEUE, buffer 2;
22$ SCAN: STATE(resource 1)=-1:NEXT(18$);
;
;
; Model statements for module: Assign 6
;
18$ ASSIGN: TimeIN=TNOW:
WIP=WIP+1:
Jobtype=1:
TempoP=tempo(dia):NEXT(24$);
;
;
; Model statements for module: Route 5
;
24$ ROUTE: 0.000000000000000,Enter 1.Station;
15$ SEIZE, 1,Other:
POLCA2,1:
POLCA1,1:NEXT(19$);
19$ QUEUE, buffer 1;
20$ SCAN: STATE(resource 1)=-1:NEXT(21$);
;
;
; Model statements for module: Assign 7
;
21$ ASSIGN: Jobtype=2:
TimeIN=TNOW:
WIP=WIP+1:
TempoP=tempo2(dia):NEXT(24$);
;
;
; Model statements for module: Create 8
;
234$ CREATE, 1,MinutesToBaseTime(0.0),Entity 1:MinutesToBaseTime(1440):NEXT(235$);
235$ ASSIGN: Create 8.NumberOut=Create 8.NumberOut + 1:NEXT(25$);
;
;
; Model statements for module: Assign 8
;
25$ ASSIGN: Dia=Dia+1:NEXT(27$);
;
;

```

```
; Model statements for module: Decide 1
;
27$    BRANCH,    1:
        If,Dia==8,238$,Yes:
        Else,239$,Yes;
238$    ASSIGN:    Decide 1.NumberOut True=Decide 1.NumberOut True + 1:NEXT(28$);
239$    ASSIGN:    Decide 1.NumberOut False=Decide 1.NumberOut False + 1:NEXT(26$);
;
;
; Model statements for module: Assign 9
;
28$    ASSIGN:    Dia=1:NEXT(26$);
;
;
; Model statements for module: Dispose 2
;
26$    ASSIGN:    Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
240$   DISPOSE:   Yes;
```

