Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Carmo Mortágua

Estudo de Mecanismos de Controlo da Atividade Produtiva Baseados em Cartões na Produção por Encomenda

outubro de 2014

João Pedro Carmo Mortágua **Estudo de Mecanismos de Controlo da Atividade Produtiva Baseados em Cartões na Produção por Encomenda** UMinho | 2014

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Carmo Mortágua

Estudo de Mecanismos de Controlo da Atividade Produtiva Baseados em Cartões na Produção por Encomenda

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Sílvio do Carmo Silva
e do
Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

outubro de 2014

DECLARAÇÃO

Nome: João Pedro Carmo Mortágua

Endereço eletrónico: jpc.mortagua@gmail.com

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13360575

Título da dissertação: Estudo de Mecanismos de Controlo da Atividade Produtiva Baseados em Cartões na Produção por Encomenda

Orientadores:

Professor Doutor Sílvio do Carmo Silva

Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Ano de conclusão: 2014

Mestrado em Engenharia de Sistemas

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, _____/_____/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado a todos aqueles que tornaram possível a realização desta dissertação. A todos eles exprimo o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar ao Doutor Sílvio do Carmo Silva quero agradecer por todo o tempo despendido na passagem de conhecimentos, sugestões e incentivo e pela exigência e rigor. A sua experiência e sabedoria foram muito importantes para me orientar na realização desta dissertação.

Quero agradecer também ao Doutor Nuno Octávio Fernandes pelo apoio e pela orientação na realização deste trabalho e pela disponibilidade e dinamismo em ajudar-me a resolver os problemas que foram surgindo e em particular pela sua ajuda na simulação sem a qual o trabalho teria sido muito mais árduo.

Aos meus pais pelo apoio incondicional que me dão e também porque tudo aquilo que sou hoje é devido aos valores que me transmitiram e continuam a transmitir.

À minha namorada por ter estado sempre do meu lado, nos bons e maus momentos, e por me ter incentivado no meu percurso académico.

Ao Elton Rodrigues, Vítor Nunes e João Campos pela amizade e pela compreensão nas vezes que estive ausente.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo do meu percurso académico, ao meu grupo de carnaval *Xatiados* e à Confraria do Matador pelos momentos partilhados que foram de grande importância nesta etapa da minha vida.

RESUMO

O Controlo da Atividade Produtiva (CAP) é uma função da Gestão da Produção importante para o sucesso de uma empresa. O sucesso desta atividade de controlo depende do sistema produtivo e do mecanismo de controlo utilizado e o seu ajuste ou alinhamento com as caraterísticas da produção face ao mercado. Alguns mecanismos utilizam cartões para controlar os lançamentos e o fluxo dos materiais no espaço fabril. Estes mecanismos são maioritariamente utilizados por empresas com um ambiente de produção para *stock* (MTS) onde são bastante eficazes. Contudo em ambiente de produção por encomenda (MTO), elevada variabilidade de produto e elevada variação na procura, os mecanismos baseados no controlo de carga (*Workload Control* – WLC) são considerados como os mais adequados.

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o desempenho dos mecanismos baseados em cartões, nomeadamente o CONWIP, o Generic POLCA e o Generic Kanban System, num ambiente de produção por encomenda, comparando-os com mecanismos baseados no controlo de carga (Workload Control). A comparação foi feita usando um modelo de simulação de um sistema produtivo do tipo *flow shop* com seis estágios produtivos, cada um com uma única máquina, usando o software de simulação Arena®. As principais medidas de desempenho usadas no estudo foram a percentagem de trabalhos atrasados, o desvio padrão dos atrasos e o tempo em curso no espaço fabril. Analisam-se ainda alternativas para refinar os mecanismos baseados em cartões de forma a melhorar o seu desempenho na produção por encomenda.

Os resultados obtidos mostram que o mecanismo GKS é o que apresenta melhor desempenho, entre os mecanismos baseados em cartões, no ambiente produtivo considerado. Contudo, o desempenho dos mecanismos baseados no controlo de carga é significativamente melhor que o desempenho destes mecanismos. Os resultados obtidos mostram ainda que os refinamentos propostos aos mecanismos baseados em cartões, nomeadamente ao nível do número de cartões que é atribuído a cada trabalho no momento do seu lançamento em produção, permite melhorar significativamente o desempenho destes, aproximando-os do desempenho dos mecanismos baseados no controlo de carga.

De uma forma geral os resultados deste trabalho tem importantes implicações práticas, uma vez explora a possibilidade de utilizar mecanismos simples e de fácil adoção por Pequenas e Médias Empresas (PME's) na produção por encomenda.

Palavras-Chave: MECANISMOS BASEADOS EM CARTÕES, MECANISMOS BASEADOS NO CONTROLO DE CARGA, PRODUÇÃO POR ENCOMENDA, SIMULAÇÃO.

ABSTRACT

The Production and Materials Flow Control (PMFC) is an important activity contributing for the achievement of the strategic objectives of a company, e.g. fast and reliable delivery of orders to customers. The success of the PMFC activity depends on the production system configuration and the PMFC mechanisms alignment with the production environment to satisfy the different patterns of demand. Probably the most important functions of the PMFC activity are the controlled release of jobs into the system and the authorization to start production in every work center. Some mechanisms release jobs and authorize production, and withdrawal of raw materials, with the help of cards, frequently also referred as kanbans. These mechanisms have been mostly used in make to stock environments, from where consumer orders or materials supply orders are satisfied. However, under make to order, high product variety and demand variability, few practical cases are known of application of card-based mechanisms. Instead, PMFC is mostly carried out using methods based on Workload Control (WLC). Moreover, their relative performance for PMFC in make-to-order (MTO) is not well known.

The main objective of this work was to evaluate the performance of CONWIP, Generic POLCA and Generic Kanban System, in MTO, comparing them with two other mechanisms based on WLC, namely the Workload Bounding and Workload Balancing. The comparison was carried out using the Arena® simulation software having as the main production system configuration set a flow shop with six manufacturing stages. The main performance measures considered are the percentage of tardy jobs, the standard deviation of the lateness and the shop floor throughput time. In order to improve the performance behavior of the card-based mechanisms in MTO some refinements were proposed.

The results showed that GKS and GPOLCA perform better than CONWIP with a slight edge for the GKS based on timing performance measures such as tardy orders and standard deviation of the lateness. The refinements had a strong impact on improving performance of the mechanisms. However the two workload based mechanisms achieve better performance with an apparently better performance of the workload balancing mechanism.

In spite of this we argue that the best card-based mechanisms can be attractive solutions for PMFC, in small and medium companies, due to its simplicity of use and easiness to implement and manage without requiring any special, sophisticated or complex system for data acquisition, processing and monitoring, as is required by workload based mechanisms that do not use cards.

KEYWORDS: CARD-BASED MECHANISMS, WORKLOAD CONTROL MECHANISMS, MAKE TO ORDER, SIMULATION.

ÍNDICE

Agradecimentos iii
Resumo v
Abstract vii
Lista de Figuras xiii
Lista de Tabelas xv
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos xvii
1. Introdução 1
1.1 Contextualização 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Metodologia da investigação 3
1.4 Organização do documento 3
2. Controlo da Atividade Produtiva 5
2.1 Lançamento 5
2.2 Despacho 6
2.3 Monitorização 7
2.4 Abordagens ao CAP 8
2.4.1 Material Requirements Planning – MRP 9
2.4.2 Workload Control – WLC 10
2.4.3 Just in Time – JIT / Lean Manufacturing 11
2.4.4 Teoria das Restrições - TOC 12
2.4.5 Quick Response Manufacturing - QRM 12
3. Mecanismos de CAP Baseados no Controlo da Carga 15
3.1 Síntese introdutória 15
3.2 Modo de operação 16
3.3 Dimensões de caracterização 17
3.3.1 Métodos de contabilização da carga no WLC 18
3.3.2 Métodos de controlo da carga no WLC 19
4. Mecanismos de CAP Baseados em Cartões 21
4.1 Síntese introdutória 21

4.2 Modo de operação 23
4.2.1 CONWIP - Constant Work in Process 23
4.2.2 GPOLCA – Generic POLCA 24
4.2.3 GKS – Generic Kanban System 25
4.3 Dimensões de caracterização 25
4.3.1 Paradigma de reposição 26
4.3.2 Abordagem ao CAP 26
4.3.3 Ambiente de produção para satisfação da procura 27
4.3.4 Configuração do sistema de produção 28
4.3.5 Paradigma de autorização de produção 28
4.3.6 Afetação dos cartões/kanbans 29
4.3.7 Informação dos cartões/kanbans 29
4.3.8 Número de loops 29
4.3.9 Caracterização dos mecanismos 32
5. Estudo Experimental dos Mecanismos de CAP 37
5.1 Enquadramento do estudo 37
5.2 Ambiente de simulação e medidas de desempenho 38
5.3 Desempenho dos mecanismos baseados em cartões 40
5.3.1 Plano de experimentação 40
5.3.2 Resultados 43
5.4 Desempenho dos mecanismos baseados em carga 46
5.4.1 Plano de experimentação 47
5.4.2 Resultados 48
5.5 Comparação entre os mecanismos baseados em cartões e baseados em carga 50
6. Conclusões e Trabalho Futuro 53
6.1 Introdução 53
6.2 Conclusões 53
6.3 Trabalho Futuro 56
Bibliografia 57

Anexo A – Resultados de Simulação 63
A1 – CONWIP 63
A2 – GPOLCA 63
A3 – GKS 65
A4 – Workload Bounding 67
A5 – Workload Balancing 68
Anexo B – Modelos de Simulação 70
B1 – Código SIMAN para o modelo de simulação do mecanismo GKS numa PFS com regra de prioridade PRT e amplitude cartão 0-20% 70
B2 – Modelo de simulação em Arena do mecanismo GKS numa PFS 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modo de operação de mecanismos baseados na abordagem Workload Control (Adaptado de: Land, 2006) 16
Figura 2 - Modo de operação do mecanismo CONWIP 24
Figura 3 - Modo de operação do mecanismo GPOLCA 24
Figura 4 - Modo de operação do mecanismo GKS 25
Figura 5 - Malhas de controlo de mecanismos baseados em cartões (Adaptado de: Fernandes e Carmo-Silva, 2005) 30
Figura 6 - Representação da malha de controlo do CONWIP com 6 estágios de produção 31
Figura 7 - Representação das malhas de controlo do TKS com 6 estágios de produção 31
Figura 8 - Ambiente de simulação do estudo experimental 39
Figura 9 - Desempenho dos mecanismos de produção para igual número de cartões e diferente número de cartões por *loop* 43
Figura 10 - Desempenho das regras de sequenciação no CONWIP, GPOLCA e GKS 44
Figura 11 - Desempenho dos mecanismos de produção para diferentes amplitudes de cartão 46
Figura 12 - Desempenho do Workload Bounding e Workload Balancing em ambiente PFS 48
Figura 13 - Desempenho do Workload Bounding e Workload Balancing em ambiente GFS 50
Figura 14 - Desempenho dos mecanismos em ambiente MTO com fluxo unidirecional 51
Figura 15 - Modelo de simulação em Arena do mecanismo GKS numa PFS 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras de prioridade utilizadas no CAP 7
Tabela 2 - Comparação das características dos mecanismos 32
Tabela 3 - Fatores de experimentação e níveis para a experimentação baseada em cartões 41
Tabela 4 - Fatores de experimentação e níveis para a experimentação baseada em carga 47
Tabela 5 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade PRT 63
Tabela 6 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade FIFO 63
Tabela 7 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade SPT 63
Tabela 8 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade PRT e igual número de cartões por *loop* 63
Tabela 9 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade PRT e diferente número de cartões por *loop* 64
Tabela 10 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade FIFO e diferente número de cartões por *loop* 64
Tabela 11 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade SPT e diferente número de cartões por *loop* 64
Tabela 12 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT e igual número de cartões por *loop* 65
Tabela 13 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-100% 65
Tabela 14 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-33% 65
Tabela 15 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-20% 66
Tabela 16 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade FIFO e diferente número de cartões por *loop* 66
Tabela 17 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade SPT e diferente número de cartões por *loop* 66
Tabela 18 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade PRT em ambiente PFS .. 67
Tabela 19 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade TWK em ambiente PFS . 67
Tabela 20 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade SPT em ambiente PFS .. 67

Tabela 21 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade PRT em ambiente GFS..67
Tabela 22 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade TWK em ambiente GFS.67
Tabela 23 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade SPT em ambiente GFS..68
Tabela 24 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade PRT em ambiente PFS..68
Tabela 25 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade TWK em ambiente PFS.68
Tabela 26 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade SPT em ambiente PFS..68
Tabela 27 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade PRT em ambiente GFS..68
Tabela 28 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade TWK em ambiente GFS.69
Tabela 29 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade SPT em ambiente GFS..69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AKS	*Adaptive Kanban System*
ATO	Montagem por Encomenda (*Assemble-to-Order*)
BBC	*Behavior-based Control*
BI	*Balancing Index*
BOM	*Bill of Materials*
CAP	Controlo da Atividade Produtiva
COBACABANA	*Control of Balance by Card-based Navigation*
CONWIP	*Constant Work In Process*
CT	Centro de Trabalho
DBR	*Drum-Buffer-Rope*
DE	Data de Entrega
DLR	*Due date and Load-based Release*
EDD	*Earliest Due Date*
EF	Espaço Fabril (*Shop Floor*)
ETO	Engenharia por Encomenda (*Engineer-to-Order*)
FIFO	*First in First Out*
FS	Linha de produção (*Flow Shop*)
GC	Grupo de Capacidade
GKCS	*Generalized Kanban Control System*
GKS	*Generic Kanban System*
GPOLCA	*Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*
GFS	Linha de produção geral (*General Flow Shop*)
JIT	*Just in Time*
JS	Oficina de produção *(Job Shop)*
LB-POLCA	*Load-based POLCA*
LOMC	*Load Oriented Manufacturing Control*
LOOR	*Load Oriented Order Release*
LUMS	*Lancaster University Management School*

LUMS COR	*Lancaster University Management School corrected order release*
MCAg	Método da Carga Agregada
MCAj	Método da Carga Ajustada (ou Corrigida)
MCC	Método da Carga Convertida
MES	Mestrado em Engenharia de Sistemas
MPS	*Master Production Scheduling*
MRP	*Material Requirements Planning*
MRPII	*Manufacturing Resources Planning*
MT	Método de Tatsiopoulos
MTO	Produção por Encomenda (*Make-to-Order*)
MTS	Produção para Stock (*Make-to-Stock*)
OPT	*Optimized Production Technology*
PCP	Planeamento e Controlo da Produção
PDC	Planeamento Diretor de Capacidade
PFS	Linha de produção geral (*Pure Flow Shop)*
PNC	Planeamento das Necessidades de Capacidade
POLCA	*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*
PRT	*Planned Release Time*
PSP	*Pre-Shop Pool*
PST	*earliest Planned operation Starting Time*
Ptardy	Percentagem de trabalhos atrasados
QRM	*Quick Response Manufacturing*
SA	*Starvation Avoidance*
SPT	*Shortest Processing Time*
SST	*Shortest Setup Time*
Std lateness	Desvio padrão dos atrasos
TBC	*Time-based competition*
TEF	Tempo em curso no Espaço Fabril
TKS	*Toyota Kanban System*
TOC	*Theory of Constraints* (Teoria das Restrições)
TTS	Tempo Total no Sistema
TWK	*Total Work Content*

WIP	*Work In Process*
WLC	*Workload Control*
WR	*Workload Regulation*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Este é o relatório do projeto de dissertação apresentado no âmbito das provas de Mestrado em Engenharia de Sistemas (MES) da Universidade do Minho.

Um aspeto crítico na concepção de sistemas de produção é a definição do mecanismo a usar no Controlo da Atividade Produtiva (CAP). Estes mecanismos abordam dois grandes problemas: o lançamento dos trabalhos em produção e o controlo do fluxo de materiais ao longo dos estágios produtivos. O CAP é uma tarefa importante e que deve ser bem pensada pois depende bastante da natureza e características do sistema produtivo a controlar e influencia muito o seu desempenho. O CAP tradicionalmente tem sido feito com base em procedimentos, predominantemente heurísticos, apoiados em informação da produção. Muitos dos mecanismos de CAP fazem uso de cartões para fazer o lançamento dos trabalhos em produção e para controlar o fluxo dos materiais no espaço fabril (EF).

Atendendo a que existem vários ambientes ou modos de satisfação da procura, geralmente resumidos na produção para stock (*Make to Stock* – MTS) e produção por encomenda (*Make to Order* – MTO), é necessário procurar o melhor método para controlar a produção, adequado às características do sistema produtivo.

Os mecanismos de CAP baseados em cartões têm importantes vantagens em relação a outros, devidas essencialmente à sua simplicidade de aplicação e eficácia no CAP. Foram inicialmente desenvolvidos para aplicação em ambiente de produção repetitiva em ambiente de pouca variedade de produtos e entrega rápida ou imediata de encomendas, o que pressupõe a existência de *stocks* de produtos finais e intermédios, i.e. em fase de fabrico, e a sua reposição logo após o consumo.

Tendo noção de que cada vez mais os clientes procuram produtos customizados (Gunasekaran e Ngai, 2005; Hart, 2005; Köber e Heinecke, 2012), i.e., produtos adaptados ou configurados de acordo com as especificações do cliente e dentro dos limites de configuração oferecidos pelo fabricante, as empresas obrigam-se a adotar a produção por encomenda para melhor e mais eficazmente responderem à variedade e variação da procura, podendo assim oferecer uma grande diversidade de produtos ao cliente.

Uma abordagem ao CAP especificamente desenvolvida para a produção por encomenda é o *Workload Control* (WLC) (Kingsman e Hendry, 2002; Stevenson, Hendry e Kingsman, 2005). Esta tem como objetivo manter a carga no espaço fabril e no sistema sob controlo. Se esta carga se mantiver reduzida e estável é possível obter tempos de percurso (i.e., tempos em que os artigos se mantêm em curso de fabrico até à sua completa fabricação) também curtos e estáveis e portanto oferecer datas de entrega competitivas e fiáveis.

A variedade de artigos em ambiente MTO tende a ser muito mais elevada do que em ambiente MTS. Isto torna pouco atrativo ou simplesmente inadequado o uso de mecanismos de cartões baseados na reposição de *stock* para a produção por encomenda, como referem Germs e Riezebos (2010), Thürer *et al*. (2012) e Harrod e Kanet (2013). Há ainda a acrescentar que a lógica de controlo em ambiente MTO não contempla a reposição de *stock*, pelo que a maioria dos referidos mecanismos não podem ser diretamente aplicados em MTO. Contudo, convenientemente adaptados e como sugerem Stevenson, Hendry e Kingsman (2005) alguns mecanismos baseados em cartões podem ter potencial para serem aplicados em ambiente MTO.

Este trabalho pretende avaliar o desempenho de mecanismos de CAP baseados em cartões em ambiente de produção por encomenda, comparando-os com mecanismos baseados em controlo de carga (*Workload Control*) e adaptando-os de forma a melhorar o seu desempenho.

1.2 Objetivos

Assim, o objectivo principal deste trabalho é fazer um estudo do desempenho e aplicação prática de mecanismos de CAP baseados em cartões para um ambiente de produção por encomenda. O estudo é baseado numa revisão da literatura, fazendo um levantamento dos mecanismos baseados em cartões considerados mais relevantes. Deve ser selecionada uma amostra de mecanismos de CAP baseados em cartões para serem objeto de estudo. Posteriormente analisam-se alternativas para refinar os mecanismos de forma a torná-los eficientes e eficazes no CAP em MTO. Para avaliar o seu desempenho no contexto da produção por encomenda recorre-se à simulação por computador.

Procura-se portanto perceber que vantagens poderão existir na utilização de mecanismos baseados em cartões e como se comportam estes mecanismos num ambiente de produção por encomenda.

1.3 Metodologia da investigação

O trabalho começa por fazer uma introdução conceptual ao Controlo da Atividade Produtiva e às abordagens de CAP existentes. Sendo o *Workload Control* uma abordagem adequada à produção por encomenda, tem relevância estudar mais em detalhe esta abordagem, pois poderá ser possível e desejável a combinação desta com mecanismos baseados em cartões para que estes desempenhem melhor em MTO.

Depois faz-se uma análise dos mecanismos de CAP, identificando aqueles que podem ser implementados com cartões de controlo, também referidos como *kanbans*. Desta análise são identificados os mecanismos mais relevantes na literatura. Estes mecanismos são devidamente caracterizados e diferenciados. Esta diferenciação é realçada a partir das necessidades de parametrização dos diferentes mecanismos para efeitos de controlo da atividade produtiva. Em seguida são identificados refinamentos possíveis a mecanismos de especial relevância que ajustam ao uso ou aplicação na prática da produção por encomenda, com vista a torná-los mais flexíveis e de aplicação mais abrangente.

Da análise e relevância dos mecanismos é feita uma seleção limitada a alguns mecanismos julgados importantes, cujo desempenho comparativo é avaliado por simulação usando o *software* de simulação Arena®.

Esta comparação é baseada em medidas de desempenho relevantes e num plano de experimentação que permite comparar o desempenho de mecanismos baseados em cartões, com os mecanismos baseados em carga que não usam cartões. Os resultados da experimentação são analisados e discutidos procurando identificar vantagens e desvantagens de aplicar mecanismos baseados em cartões à produção por encomenda.

1.4 Organização do documento

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. O capítulo dois faz uma introdução a alguns conceitos do CAP e uma revisão da literatura das abordagens de CAP. O capítulo dá a conhecer a área da Gestão da Produção onde se insere o CAP e faz uma descrição das tarefas do CAP.

O capítulo três foca-se nos mecanismos de CAP baseados no controlo de carga. Este capítulo procura tratar em detalhe alguns aspectos da abordagem de controlo de carga (WLC), nomeadamente as fases de controlo no fluxo de trabalhos, métodos de contabilização de carga e métodos de controlo de carga.

O capítulo quatro aborda os mecanismos de CAP baseados em cartões. Este capítulo faz uma revisão da literatura destes mecanismos e procura estudar detalhadamente os mais relevantes descrevendo o seu funcionamento e características.

O capítulo cinco começa por enquadrar o estudo e sugerir eventuais refinamentos baseados na abordagem WLC aplicados ao conjunto de mecanismos baseados em cartões escolhidos com o objetivo de melhorar o seu desempenho em ambiente MTO. Neste capítulo é também feito o estudo de simulação relativo ao desempenho dos mecanismos de CAP em ambiente de produção por encomenda. É feita a descrição do ambiente de simulação e as medidas de desempenho consideradas no estudo. De seguida é apresentado o plano experimental, o qual é desenvolvido em três fases. Na primeira procura-se estudar o desempenho dos mecanismos de CAP baseados em cartões, a segunda estuda o desempenho de mecanismos de CAP baseados em carga e a terceira compara o desempenho destes dois tipos de mecanismos.

Por fim o capítulo seis apresenta as principais conclusões do trabalho realizado e sugestões para trabalho futuro.

2. CONTROLO DA ATIVIDADE PRODUTIVA

O Controlo da Atividade Produtiva (CAP) é parte do planeamento e controlo da produção (PCP). O PCP tem como missão genérica o uso eficiente e eficaz dos recursos de produção no cumprimento dos prazos e fornecimento dos produtos encomendados pelos clientes. Incide sobre o planeamento das necessidades de materiais, a gestão da procura, planeamento de capacidade e a programação e sequenciação de trabalhos (Stevenson *et al.*, 2005). No contexto do PCP, o CAP planeia, dirige e controla o fluxo de materiais e as atividades de produção na empresa (Burbidge, 1990). O seu objetivo principal é o estabelecimento e cumprimento dos prazos de entrega e programas de produção e a boa utilização dos recursos de produção (Carmo-Silva, 2010).

A importância do controlo da produção varia principalmente com o tipo de produção e sistema de produção que, naturalmente, deverão estar adaptados à natureza do mercado e da procura do produto (Carmo-Silva, 2010). Com vista à satisfação da procura as empresas podem classificar-se em duas principais tipologias (Bozarth e Chapman, 1996): Produção para Stock - *Make-to-Stock* (MTS) e Produção por Encomenda - *Make-to-Order* (MTO).

O CAP é uma função de curto prazo abrangendo as seguintes tarefas de controlo incidentes sobre os trabalhos ou ordens de fabrico a executar:

- Lançamento
- Despacho
- Monitorização

A monitorização fornece informação às duas tarefas anteriores.

Estas tarefas são recorrentes realizando-se sucessivamente e repetidamente em ciclos periódicos ou de forma contínua. O período típico de lançamento na prática industrial é o dia ou o turno, podendo no entanto ser mais longo, e.g. semana, ou mais curto, e.g. hora.

2.1 Lançamento

O Lançamento corresponde à tarefa de determinação do momento e dos trabalhos a lançar nesse momento em produção. Lançar trabalhos em produção significa libertá-los para o espaço fabril para serem executados de acordo com o seu plano operatório procurando cumprir as datas planeadas de

conclusão. O lançamento só se realiza depois de se assegurar a disponibilidade de todos os materiais, meios de produção, principais (i.e., máquinas), e auxiliares (i.e., ferramentas), e dossiês de informação de fabricação dos trabalhos a lançar (Carmo-Silva, 2010).

Como afirma Bechte (1988) o lançamento é uma atividade que determina a quantidade de trabalhos no espaço fabril, i.e., *Work-in-process* (WIP), e por sua vez o *lead time* dos trabalhos, i.e., o tempo estimado para a produção de cada artigo.

O lançamento de trabalhos em produção pode ser feito periodicamente, i.e., a intervalos de tempo definidos ou de forma contínua, i.e., sem periodicidade definida (e.g. Fernandes e Carmo-Silva, 2011a). No lançamento periódico, os lançamentos ocorrem normalmente no inicio do período de lançamento. No lançamento contínuo, o lançamento de trabalhos para o sistema pode ocorrer a qualquer momento: se for imediato, o trabalho é lançado assim que chega ao sistema, i.e. à *pool* de entrada do sistema, sem qualquer restrição; se for controlado, o trabalho é lançado assim que as condições do sistema o permitirem. Claramente, neste caso a monitorização das condições do sistema é uma necessidade.

É importante referir que o processo de lançamento de trabalhos difere dependendo da tipologia usada para garantia da satisfação da procura. No caso em que a produção é feita para *stock*, existe apenas a preocupação de repor o produto que foi consumido, isto quer dizer que a fase de lançamento deve apenas encarregar-se de dar a autorização para o início de um trabalho quando tal é solicitado, tendo a garantia de que os recursos necessários estão disponíveis. No caso em que a produção é feita por encomenda, o processo deve ter em conta o cumprimento das datas de entrega acordadas com o cliente.

2.2 Despacho

O despacho é a tarefa do CAP que está encarregue de selecionar de entre os trabalhos em fila de espera, o próximo trabalho a ser processado num centro de trabalho (CT) que fique livre.

O despacho pode por vezes ter de resolver o problema de afetação. Isto acontece, e.g., na situação em que, no momento de despacho, existam dois ou mais centros de trabalho alternativos livres capazes de executar a operação necessária do trabalho. Neste caso é necessário decidir qual o que executa a operação. Podem existir situações em que um CT livre fique à espera de trabalhos prioritários apesar de ter trabalhos em espera que podem ser processados. Esta prioridade pode ter a ver com prazos de entrega ou ser devida a razões económicas ou técnicas, i.e. de *set-ups*.

Normalmente o despacho socorre-se de regras de prioridade para despachar os trabalhos nas diversas máquinas ou centros de trabalho. São várias as regras de prioridade existentes. A regra a aplicar deve ser adequada aos objetivos de desempenho a atingir. A Tabela 1, apresenta algumas das regras de prioridade mais usadas, testadas por autores como Rochette e Sadowski (1976), Blackstone, Phillips e Hogg (1982), Rajendran e Holthaus, (1999).

Tabela 1 - Regras de prioridade utilizadas no CAP

Regra	Método de Ordenação
FIFO – First in First Out	Ordem de chegada, em que o primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido na máquina
SPT – Shortest Processing Time	Tempo de processamento, em que o trabalho com o menor tempo é o primeiro a ser atendido na máquina
EDD – Earliest Due Date	Data de entrega, em que o trabalho com a data mais próxima é o primeiro a ser atendido na máquina
SST - Shortest Setup Time	Tempo de *setup,* em que o trabalho com o menor tempo de *setup* é o primeiro a ser atendido na máquina
TWK – Total Work Content	Tempo de processamento total, onde o trabalho com o maior tempo é o primeiro a ser atendido na máquina
PST – Planned operation Start Time	Urgência, obtida por programação regressiva a partir das datas de entrega utilizando o *lead time dos centros de trabalho*

Algumas regras de prioridade usadas no despacho podem ser também ser utilizadas ao nível do lançamento dos trabalhos, designam-se neste caso de regras de sequenciação para o lançamento. A influência destas na decisão do lançamento dos trabalhos foi recentemente discutida por Thürer *et al.* (2014).

Frendendall, Ojha e Patterson (2010) estudaram a influência de regras de prioridade no desempenho do CAP usando a abordagem WLC evidenciando as diferenças de desempenho entre elas.

2.3 Monitorização

A monitorização da atividade produtiva tem como objetivo principal contribuir para o correto funcionamento do sistema produtivo bem como para o cumprimento de todas as metas definidas fornecendo a informação necessária à execução das funções de lançamento e despacho. Embora haja mecanismos de CAP que resolvem de forma integrada a função de monitorização, noutras ela é autónoma e absolutamente necessária para as poder implementar na prática. Um exemplo é a

abordagem WLC. Nela faz-se a monitorização de um conjunto de variáveis necessárias à decisão de lançamento e despacho. Assim, é importante saber como estão os trabalhos a fluir através do sistema, onde estão e em que fase de desenvolvimento. Além da monitorização dos trabalhos pode também ser necessário monitorizar a carga em cada centro de trabalho e no sistema.

A monitorização permite saber, e.g., se as datas de entrega estão a ser cumpridas e tomar medidas atempadas para que o sejam, dando às empresas condições para obterem bons resultados de desempenho.

O avanço tecnológico cada vez mais facilita esta tarefa com a virtualização e automatização dos processos industriais aumentando a eficiência das organizações. A utilização de uma ferramenta informática que permita ter acesso a toda a informação relevante no espaço industrial em tempo real, facilita uma rápida resposta a qualquer decisão que necessite ser tomada. Esta ferramenta pode ser utilizada pelo gestor da produção bem como todos os funcionários envolvidos nos processos de produção, permitindo uma melhor comunicação entre os vários setores da empresa e ao mesmo tempo podendo funcionar como uma garantia da segurança mantendo os processos mais seguros. Esta ferramenta garante ainda que seja possível ao gestor da produção:

- Ter conhecimento de toda a informação do sistema em tempo real
- Consultar um histórico, com gráfico e tabelas, contendo todos os indicadores de desempenho do sistema
- Atuar rapidamente com base na informação obtida e obter melhores resultados de desempenho.

2.4 Abordagens ao CAP

As abordagens são procedimentos genéricos de Controlo da Atividade Produtiva onde se podem inserir vários mecanismos de CAP. Um mecanismo de CAP refere-se a qualquer procedimento ou processo destinado a controlar a produção e o fluxo de materiais de um sistema de produção, podendo estender a sua ação desde a aquisição de matérias-primas até à entrega de produtos finais aos clientes. Como é natural, os sistemas de produção não são todos iguais, o que faz com que existam várias abordagens para o PCP, dependendo das características de produção e procura.

Cinco abordagens diferentes ao CAP são identificadas por Carmo-Silva (2013):

- *Material Requirements Planning* (MRP)
- Controlo de Carga (*Workload Control* – WLC)
- *Just in Time* (JIT)/ *Lean manufacturing*
- Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC)
- *Quick Response Manufacturing* (QRM)

2.4.1 Material Requirements Planning – MRP

O MRP (*Material Requirements Planning*) é uma abordagem que começou a surgir na década de 60 do séc. XX baseada no cálculo das necessidades materiais, em que Joseph Orlicky, Oliver Wight e George Plossl foram precursores (Plossl e Orlicky, 1994). A motivação do MRP está na necessidade de gerir os desperdícios no *stock* dos artigos intermédios e matéria prima, denominados artigos dependentes (Benton e Shin, 1998) já que podem ser calculados a partir dos artigos encomendados ou a fornecer ao mercado em momentos bem determinados. O MRP usa três elementos fundamentais de informação para obter um programa integrado de produção e de aquisição de matérias-primas (plano de lançamentos), nomeadamente: 1) o *Master Production Scheduling* – MPS, programando as necessidades de produção de artigos a vender, i.e., definindo a quantidade e o período em que a produção deve ser concluída com base nas previsões da procura e encomendas de clientes; 2) a lista de materiais (*Bill of Materials* – BOM) de cada produto, que identifica e representa as quantidades constituintes de cada produto, i.e., artigos intermédios e matéria-prima; 3) a informação das existências de todos os materiais, i.e., matérias-primas, produtos intermédios e produtos acabados e por vezes meios auxiliares a produzir e/ou encomendar.

Com base no MPS e nos *lead times* de cada artigo, i.e., nos tempos estimados para a produção de cada artigo, o sistema MRP programa os lançamentos, i.e., ordens de produção, e os períodos ou datas em que devem ser libertadas para produção. Por este facto, o MRP é considerado uma abordagem de lançamentos com datas programadas, i.e., assume-se que os trabalhos ou ordens de produção entram para produção naquele período independentemente do estado real do sistema, que na verdade não se pode conhecer antecipadamente, embora se possa estimar de forma grosseira ou agregada. Devido a contingências várias da dinâmica da procura e da produção, principalmente em situações de procura variável e instável, esta abordagem pode levar a erros grosseiros de planeamento

da produção (Depuy *et al.*, 2007). Cheng (1987) estudou a influência da incerteza no planeamento das necessidades de capacidade, aconselhando um controlo rigoroso na origem dos problemas que causam a variação de forma a alcançar um nível de precisão que permite obter um planeamento mais acertado.

Pelo facto do MRP não resolver da melhor forma as restrições de capacidade do sistema produtivo surgiu o MRPII (*Manufacturing Resources Planning*). Este consiste numa extensão do MRP onde aos três elementos fundamentais de informação se acrescentam o Planeamento Diretor de Capacidade (PDC) e o Planeamento das Necessidades de Capacidade (PNC). A função do PDC é verificar a validade do PDP perante a quantidade de recursos disponível. O PDC serve portanto para verificar se o MPS é exequível, e no caso de não o ser proceder à sua correção. O PNC determina quais são as necessidades de capacidade, dos vários tipos de recurso ou CT, para cumprir o programa de lançamentos estabelecido pelo MRP, obtendo-se assim a carga programada de cada CT em cada período. Com a adição destas duas funções e no pressuposto de que se faz uma programação finita, i.e. não se ultrapassa a capacidade disponível em cada período, é possível um melhor controlo de entradas para o EF, evitando o acumular excessivo de carga, ou trabalho em curso de fabrico, i.e. *Work-in-process*. Apesar de passar a controlar melhor a capacidade do sistema, o MRPII continua a não resolver os problemas de imprecisão típica dos *lead times*, geralmente excessivos, e da previsão da procura, o que pode levar a tempos em curso de fabrico mais longos que o necessário.

2.4.2 Workload Control – WLC

O *Workload Control* (WLC) é uma abordagem que surgiu no seguimento do chamado *Input/output Control* (Wight, 1970), desenvolvido para se adequar a ambientes de produção de complexidade alta como *job shops* e empresas com um ambiente de satisfação da procura MTO (Stevenson e Hendry 2006). O *Input/output Control*, resumidamente, lança trabalhos para produção consoante os trabalhos que já foram lançados são concluídos, de forma a manter a carga do sistema e os *lead times* controlados. Estas são metas comuns do WLC.

O objetivo genérico do WLC é, reduzir o tempo em curso de fabrico dos trabalhos com vista a melhor cumprir as datas de entrega acordadas das encomendas negociadas (Fernandes e Carmo-Silva, 2011a). A estratégia usada para atingir tal objetivo, depois de se assegurar que a capacidade produtiva satisfaz a procura, é encontrar o tamanho ideal das filas de espera no espaço fabril (EF) e controlá-lo, para controlar o tempo em que os trabalhos permanecem em curso de fabrico. Para tal, o WLC

controla o lançamento dos trabalhos no EF de forma a garantir que o trabalho lançado para o EF (*input*) não ultrapasse a capacidade (*output*) deste para executar os trabalhos a tempo, assegurando-se de que à medida que os trabalhos são concluídos novos trabalhos são lançados no sistema, garantindo-se assim taxas de entrada iguais às de saída. Se a taxa de entrada for superior à taxa de saída podem ocorrer congestionamentos e atrasos nas datas de entrega. Caso se passe o contrário o sistema fica subaproveitado.

No geral, todos os mecanismos baseados no WLC usam uma zona (real ou virtual) de lançamento conhecida como *pre-shop pool* (PSP), ou simplesmente *pool* que reúne os trabalhos prontos a lançar. O lançamento, contínuo ou periódico, toma em consideração entre outros fatores de decisão a carga de cada centro de trabalho e o seu limite de carga autorizado e a carga associada a cada trabalho em cada centro (Thürer *et al*. 2011). Uma vez lançado, o trabalho permanece no EF até que todas as suas operações sejam concluídas.

2.4.3 Just in Time – JIT / Lean Manufacturing

A filosofia de produção *Just In Time* (JIT) é uma filosofia desenvolvida no Japão por Taiichi Ohno (1988), que surgiu pela necessidade de produzir com custos de produção mais baixos através da eliminação de desperdícios. Esta filosofia consiste em "produzir o necessário, no momento certo e nas quantidades exatas" (Sugimori *et al*., 1977; Ohno, 1988) e começou a ganhar popularidade no ocidente devido ao seu sucesso na industria Japonesa. Além das vantagens económicas a filosofia JIT veio trazer também um maior nível de satisfação do cliente por fazer entregas atempadas e garantir uma melhoria na qualidade dos produtos (para uma leitura mais aprofundada sobre os benefícios da implementação do JIT em empresas ver: Yasin et al. 1997; Fullerton e McWatters, 2001; para uma revisão recente do estado da arte sobre a filosofia JIT ver Sultana e Ahmed, 2014). Baseado nesta filosofia surgiu o *Toyota Kanban System* – TKS, também conhecido na literatura por *Kanban System*, um mecanismo que utiliza *kanbans* para controlar a produção. Um *kanban* é um documento usado para autorizar o levantamento ou fornecimento de uma quantidade de artigo, i.e., funcionando como requisição de materiais, e autorizar a produção no CT apropriado de uma quantidade de artigo igual à levantada ou fornecida, i.e., funcionando como ordem de produção. Por vezes separam-se estas funções criando *kanbans* de fornecimento que se trocam com *kanbans* de produção.

Analisando as diferenças entre o JIT e o MRP vemos que o JIT, normalmente, usa um procedimento de reposição de stock usando frequentemente cartões para autorizar a reposição. Por sua vez o MRP

elabora um programa de lançamentos de trabalhos ou artigos a produzir para satisfazer a procura, indiretamente expressa no programa diretor. O programa é feito para cada fase de produção, e a nível do CAP para cada CT, definindo o inicio e fim programado da execução dos trabalhos baseado no intervalo de tempo, i.e. nos *lead times*, em que devem ser produzidos nos centros de trabalho.

2.4.4 Teoria das Restrições - TOC

Uma das filosofias que explora profundamente a abordagem baseada em *bottlenecks* (centros de trabalho críticos) ficou conhecida graças ao *Optimized Production Technology* (OPT) um *software* desenvolvido por Eliyahu Goldratt para a programação da produção. Este *software* veio oferecer uma metodologia de programação finita baseada na maximização da produção através do *bottleneck* do sistema (Cox e Spencer, 2002) e consiste dum conjunto de procedimentos de gestão da produção que incorpora a abordagem de controlo baseada em *bottlenecks*. Devido ao sucesso do OPT, Goldratt foi desenvolvendo um conjunto de princípios que mais tarde veio a ser conhecido como a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC). Partindo do princípio que uma empresa produz sempre com algum tipo de restrição, esta abordagem consiste em identificar essas restrições e explorar ao máximo as suas capacidades pois será o desempenho dos recursos com restrições que definem o desempenho do sistema (Gülsün et al. 2009).

Com base nesta filosofia Goldratt propôs um mecanismo de produção conhecido por *Drum-Buffer-Rope* (DBR) onde é o CT crítico que determina o ritmo de produção do sistema. Este mecanismo tem em consideração o trabalho total na rota do CT crítico. A abordagem de controlo de carga apresenta algumas semelhanças com a TOC, mas em vez de marcar o ritmo de produção para um CT crítico olha para todos os centros de trabalho e controla a carga de todos para manter o equilíbrio do sistema, numa lógica similar à usada no balanceamento de linhas de produção, mas numa perspetiva agregando todos os artigos lançados.

2.4.5 Quick Response Manufacturing - QRM

Depois da evolução do *software* OPT para a filosofia da Teoria das Restrições - TOC, um novo conceito começou a surgir em finais da década de 80 focalizado na redução dos tempos nos processos de uma empresa (Bozarth e Chapman, 1996). O conceito, conhecido como *Time-based competition* - TBC (Stalk, 1988) tem origem japonesa e baseia-se em proporcionar aos seus produtos um maior valor acrescentado em menos tempo e com menos custos beneficiando de uma maior flexibilidade e melhor

posição no mercado competitivo (Hum e Sim, 1996; Sim e Curatola, 1999). A dificuldade do TBC está em conciliar a qualidade com a velocidade de resposta. O TBC surgiu para ser aplicado a qualquer tipo de negócio (e.g., bancos, companhias de seguros, hospitais), razão pela qual faltavam alguns conceitos importantes para ser aplicada para a produção (Suri, 2003). Por esta razão, inspirado no conceito do TBC, Suri (1998) introduziu o *Quick Response Manufacturing* (QRM), uma nova abordagem que veio acrescentar alguns princípios aos já adoptados pelo TBC. O QRM procura reduzir os *lead times* de produção externos, na resposta às necessidades do cliente e internos, reduzindo os tempos de operações de produção, melhorando a velocidade de resposta ao mesmo tempo que garante melhorias na qualidade e redução de custos (Fernandes e Carmo-Silva, 2006). Para conseguir uma redução dos *lead times* o QRM faz uso de princípios de gestão detalhados, métodos de produção, técnicas de análise e ferramentas que usam conceitos básicos da dinâmica de sistemas (i.e., formas para compreender o funcionamento de sistemas complexos ao longo do tempo) (Suri, 2003).

3. MECANISMOS DE CAP BASEADOS NO CONTROLO DA CARGA

3.1 Síntese introdutória

Os mecanismos abordados neste capítulo são aqueles que se baseiam na abordagem *Workload Control* (WLC) apresentada na secção 2.4.2. Neste tipo de mecanismos, desenhados especificamente para ambientes com uma elevada variedade de produtos em ambiente MTO, o controlo do lançamento dos trabalhos é baseado no controlo da carga no espaço fabril. Exemplos destes mecanismos são:

- *Workload Regulation* (WR)
- *Starvation Avoidance* (SA)
- *Due date and Load-based Release* (DLR)
- *Load Oriented Order Release* (LOOR)
- *Lancaster University Manufacturing System* (LUMS)

O *Workload Regulation* (Wein, 1988) e o *Starvation Avoidance* (Glassey e Resende, 1988) são dois mecanismos que procuram evitar a paragem do centro de trabalho crítico de um sistema de produção. No WR, é definido um limite carga para o CT crítico, e quando a carga desse CT atinge o limite um novo trabalho é libertado para o EF. No SA a carga que se espera que chegue ao CT crítico não deve baixar de um determinado limite. Para isso é usado um *stock* virtual no CT crítico para medir mais apropriadamente a carga que se espera que chegue a esse CT. O *stock* virtual inclui o tempo total de processamento no CT crítico das próximas operações de todos os trabalhos que cheguem ao CT crítico dentro de um determinado *lead time* somado ao tempo esperado de reparação das máquinas que possam avariar.

O *Load Oriented Order Release* (LOOR) foi desenvolvido por Bechte (1980) no âmbito da abordagem *Load-Oriented Manufacturing Control* (LOMC) (Bechte, 1988; Bechte 1994; Wiendahl, 1995). A abordagem de *Lancaster University Manufacturing System* (LUMS) foi originalmente desenvolvido por Bertrand e Wortmann (1981), e posteriormente por Tatsioupoulos (1983), Hendry (1989) e Hendry e Kingsman (1991). Estes mecanismos têm em comum a forma como controlam a carga no sistema, i.e., utilizando normas de carga. A diferença entre eles é que cada um utiliza um método diferente para

contabilização da carga lançada para o sistema. Breithaupt, Land e Nyhuis (2002) apresentam e discutem as diferentes abordagens ao controlo da carga.

Com o intuito de concluir os trabalhos atempadamente de acordo com a data de entrega definida e de forma a minimizar o desvio padrão dos atrasos, Sabuncuoglu e Karapinar (2000) desenvolveram o *Due date and Load-based Release* (DLR). Neste mecanismo o lançamento dos trabalhos é feito periodicamente e a sequenciação dos trabalhos na *pool* tem em consideração as datas de entrega estipuladas para os trabalhos.

Muitos dos mecanismos baseados na abordagem WLC são referidos e descritos por Hendry e Kingsman (1989), Land e Gaalman (1996), Zäpfel e Missbauer (1993), Stevenson *et al.* (2005) e Fowler *et al.* (2002).

Thürer, Stevenson e Silva (2011) fazem uma revisão geral (conceptual, analítica, empírica e de estudos de simulação) da literatura sobre o WLC entre os anos 1980 e 2009.

3.2 Modo de operação

As decisões de PCP no âmbito do WLC (*Workload Control*) estendem-se principalmente às fases de chegada ou entrada de trabalhos ao sistema produtivo, de lançamento dos trabalhos em produção, i.e. no espaço fabril, e de despacho. Por vezes também é considerada a fase de negociação das encomendas com o cliente. A Figura 1 apresenta o modo de operação de mecanismos baseados na abordagem WLC.

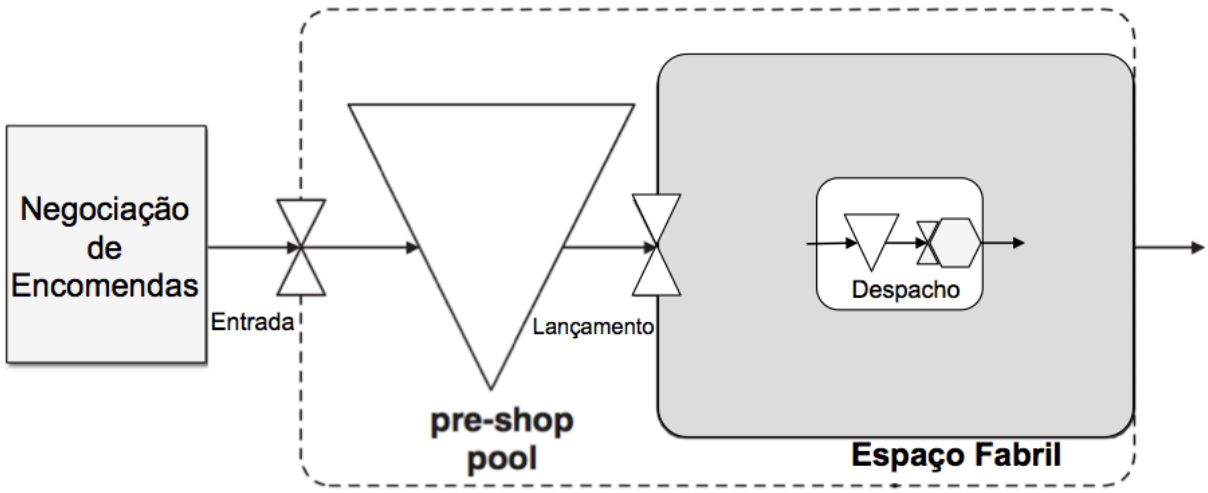

Figura 1 - Modo de operação de mecanismos baseados na abordagem Workload Control (Adaptado de: Land, 2006)

Na fase denominada de entrada, após aceitação, as encomendas fluem para uma *pre-shop pool* onde aguardam o lançamento. Antes de lançar em produção as encomendas é necessário criar ordens de fabrico, planear o processo produtivo, adquirir materiais, etc.. Nesta fase a data de entrega já é conhecida, tendo resultado da fase de negociação. Pode contudo acontecer que o cliente tenha demorado demasiado tempo a responder à proposta da empresa, tendo entretanto sido aceites outras encomendas, não sendo mais possível assegurar a entrega na data previamente proposta. Neste caso, a empresa poderá ter que recusar a encomenda ou propor uma nova data de entrega, que poderá ou não ser aceite pelo cliente. As datas de entrega devem de ser compatíveis com a capacidade disponível, pelo que esta informação juntamente com as gamas operatórias dos trabalhos e os tempos de processamento em cada CT permitem determinar o ajustamento necessário de capacidade, que é uma ação do controlo de saídas – *output control*.

A fase seguinte, lançamento, controla o lançamento dos trabalhos para o espaço fabril. Para tal, são previamente definidas normas ou limites de carga para cada centro de trabalho no espaço fabril. No momento do lançamento a carga em cada centro de trabalho, resultante do lançamento do trabalho, é comparada com as normas de carga. O trabalho só é lançado se não fizer exceder as normas de carga dos centros de trabalho. Caso contrário é mantido na *pool* até ao próximo momento de lançamento, onde o seu lançamento será na altura novamente avaliado.

Formas alternativas de lançamento autorizam o lançamento do trabalho mesmo excedendo as normas de carga, com o objetivo de alimentar centros de trabalho que se encontrem parados por falta de alimentação (e.g., Thürer *et al.* 2012) ou com o objetivo procurar um equilíbrio mais uniforme de distribuição de carga pelos centros de trabalho (e.g., Fernandes e Carmo-Silva, 2011a). A primeira é aplicada no âmbito do método de lançamento LUMS COR (*Lancaster University Management School corrected order release*) e a segunda no âmbito dos métodos de balanceamento da carga.

Por último a fase de despacho influencia o progresso dos trabalhos no espaço fabril, encarregando-se de determinar qual o próximo trabalho a ser afetado a um recurso, i.e. máquina ou centro de trabalho, que fica livre.

3.3 Dimensões de caracterização

Os mecanismos de CAP são caracterizados através de dimensões que ajudam a compreender as diferenças/semelhanças existentes entre estes. Bergamaschi *et al.* (1997) classificam os mecanismos de CAP usados no controlo do lançamento de trabalhos num ambiente *job shop,* utilizando oito

dimensões ou classes para os caracterizar. Wisner (1995) faz uma revisão de várias estratégias de lançamento relatadas na literatura, verificando que, à exceção de um artigo, todos os outros consideram o controlo de lançamentos como uma tarefa essencial do CAP.

O controlo da carga é apresentada como uma das dimensões utilizadas por Bergamaschi *et al.* (1997). Esta descreve as várias formas como a carga presente no sistema é controlada e é descrita nesta secção como métodos de controlo da carga no WLC.

Outra dimensão utilizada por Bergamaschi *et al.* (1997) é a contabilização da carga. Esta diz respeito à forma como a carga presente no sistema é contabilizada e pode ser obtida através do número de trabalhos ou em termos da quantidade de trabalho (medido em minutos, horas, dias, etc.). A contabilização de carga através da quantidade de carga no sistema é habitualmente utilizada em mecanismos de limitação de carga. Os diferentes métodos de contabilização da carga dos trabalhos lançados no WLC neste tipo de mecanismos são descritos de seguida.

3.3.1 Métodos de contabilização da carga no WLC

Uma vez que o WLC procura manter a carga nos centros de trabalho baixa e sob controlo, importa medir a carga com que um determinado trabalho contribui para cada um dos centros de trabalho no momento do lançamento. Para tal é necessário conhecer não só a carga direta num CT, i.e. a carga resultante dos trabalhos em fila de espera e em processamento no CT, mas também a carga indireta, i.e. a carga resultante dos trabalhos que estão a montante e que irão chegar ao CT num futuro próximo. Isto deve ser tido em conta porque nem todos os trabalhos que chegam a um CT vêm diretamente da PSP. A carga indireta de um CT corresponde portanto à carga dos trabalhos já lançados que estão para chegar ao CT. Como se compreende a carga direta pode ser medida, enquanto que a indireta tem de ser estimada. O processo como esta carga é estimada, e desta forma contabilizar a carga total do CT, varia de método de contabilização de carga para método.

Um dos métodos para contabilizar, i.e., determinar em cada momento a carga de trabalho de um CT, é conhecida por **método da carga agregada** (MCAg), tendo sido introduzido por Bertrand e Wortmann (1981). Este agrega a carga indireta com a carga direta do CT. Isto quer dizer que no momento em que um trabalho é lançado para o EF, a carga do CT é atualizada com a carga do trabalho, mesmo que o CT não seja o primeiro da rota de fabrico do trabalho.

Oosterman et al. (2000) propuseram um outro método conhecido por **método da carga ajustada ou carga corrigida** (MCAj). Na versão simplificada deste método a contribuição da carga do trabalho

para a carga de qualquer CT não é igual ao tempo de processamento da operação no CT, tal como acontece na abordagem anterior, mas sim obtida dividindo a carga operatória do trabalho pela posição do centro de trabalho no roteiro de fabrico do trabalho. Por exemplo um trabalho que tenha a segunda operação com tempo de processamento de 10 horas, a sua execução num CT contabiliza para este centro com 10/2, i.e. 5 horas. Se a operação fosse a quarta na sequência de fabrico, então a contabilização seria apenas de 10/4, i.e., 2,5 horas.

Tanto no MCAg, como no MCAj a carga deixa de ser contabilizada para o CT no instante em que um trabalho conclui o seu processamento no CT.

É de referir ainda outros métodos muito conhecidos de contabilização da carga, e.g., o **método da carga convertida** (MCC) de Bechte, (1982) e o **método de Tatsiopoulos** (MT) (Tatsiopoulos, 1983).

3.3.2 Métodos de controlo da carga no WLC

Para o controlo da carga no espaço fabril são geralmente definidas normas ou limites de carga para cada centro de trabalho. Podem ser estabelecidas para limitar superiormente e/ou inferiormente a carga num CT. Com um limite superior o trabalho é lançado apenas se a carga resultante não ultrapassar esse limite. O LOOR usa esta estratégia de limite à carga. Com um limite inferior, o trabalho é lançado sempre que a carga se encontre abaixo desse limite. O SA usa esta estratégia. A estratégia que combina as duas anteriores procura manter a carga entre os valores mínimo e máximo de carga estipulados. O LUMS foi desenvolvido usando esta estratégia.

Muitas vezes a imposição de normas ou limites rígidos à carga que pode ser lançada para o espaço fabril resulta num efeito conhecido por *premature idleness* (Land e Gaalman, 1998). Isto significa que por vezes um CT pode ficar inativo por falta de carga, i.e., carga direta, pelo facto de ter uma elevada carga indireta (carga que está a montante do CT), o que impossibilita o lançamento de trabalhos para o alimentar, mantendo-o parado até que um dos trabalhos já lançados lá chegue. Estudos de vários autores como Irastorza e Deane (1974), Shimoyashiro, Isoda e Awane (1984) e Onur e Fabrycky (1987) contribuíram para obviar este efeito através de um método que use uma estratégia de balanceamento da carga. Nesta, um trabalho é apenas libertado se a sua carga contribuir para um melhor balanceamento da carga ao longo dos diversos centros de trabalho. Para medir o nível de

balanceamento resultante do lançamento de um trabalho poderá ser usando o seguinte índice de balanceamento (BI - *Balancing Index*) utilizado por (Fernandes e Carmo-Silva, 2011a):

$$BI = \sum_{j} \sum_{i} \left| N_{ij} - W_{ij} \right| \quad (1)$$

onde, W_{ij} corresponde à carga contabilizada no CT i resultante da libertação do trabalho j para o espaço fabril, e N_{ij} é o nível de carga objetivo definido para o CT i.

4. MECANISMOS DE CAP BASEADOS EM CARTÕES

4.1 Síntese introdutória

Este capítulo pretende fazer uma revisão da literatura no que se refere a mecanismos de Controlo da Atividade de Produtiva (CAP) baseados em cartões. Estes mecanismos podem ser simples de aplicar e ao mesmo tempo eficazes no CAP, i.e., o controlo do lançamento de trabalhos em produção e do fluxo dos trabalhos no espaço fabril (Thürer, Land e Stevenson, 2014). González-R, Framinan e Pierreval (2012) consideram que a popularidade destes mecanismos se deve à simplicidade do seu uso na prática e ao desempenho atrativo em termos de redução do WIP e tempos de percurso.

O mecanismo baseado em cartões mais conhecido é o *Toyota Kanban System* (TKS). Neste, à entrada de cada CT ou fase de produção existe um *stock* mínimo de trabalhos a processar, e à saída um *stock* mínimo de trabalhos processados. Na última fase do processo produtivo, estes trabalhos são produtos acabados para satisfazer as encomendas dos clientes. Estes *stocks* são geralmente mantidos em contentores normalizados, com quantidades bem definidas, sendo repostos à medida que se vão consumindo. A reposição pode fazer-se de forma contínua ou periódica, sendo geralmente feita substituindo contentores vazios por cheios. A opção por uma ou outra forma depende do contexto e de fatores diversos, sendo determinante a facilidade e rapidez de acesso, por parte do centro fornecedor, ao local de reposição na cadeia de produção, e também a variabilidade de consumo.

A reposição está associada a uma autorização de produção geralmente emanada do CT consumidor, em forma de uma ordem de produção traduzida num cartão de controlo de produção, que no TKS é designado por *kanban*. Os cartões de controlo têm portanto o objetivo de autorizar a produção e controlar o fluxo de materiais. Podem em alguns mecanismos conter informação necessária de produção do produto no CT, quando esta não é fornecida por documento auxiliar. No TKS os produtos a transformar num CT, e portanto oriundos de um local, CT ou armazém, de fornecimento, estão indicados no cartão, para fazer o seu levantamento e repor o *stock* de entrada consumido no CT ou fase de produção (Monden, 1983).

O mecanismo TKS ganhou bastante popularidade entre as empresas e os investigadores (Gupta e Gupta, 1989; Nori e Sarker, 1998), dando origem a variantes com vista à melhoria do seu desempenho e adaptação a diferentes ambientes de produção e consumo. Algumas das variantes que

podem ser encontradas na literatura são o *Minimal Blocking System* (So e Pinault, 1988), *Generic Kanban System* – GKS (Chang e Yih, 1994), o *Adaptive Kanban System* – AKS(Tardif e Maaseidvaag, 2001) e o *Generalized Kanban Control System* – GKCS (Buzacott, 1989). Para uma descrição mais detalha de variantes ao TKS remete-se para Junior e Filho (2010).

Como alternativa ao TKS e tendo também subjacente a filosofia JIT, Spearman *et al.* (1990) propuseram o mecanismo CONWIP (Constant Work in Process). Este é mais simples e de aplicação mais generalizada que o TKS. A produção é também controlada por cartões, contudo estes são atribuídos a quaisquer trabalhos no momento do lançamento e, portanto não são específicos nem de centros de trabalho, nem de tipos de trabalho ou produto, como sucede no TKS. No CONWIP quando uma ordem de produção é terminada ou quando um produto é consumido de stock, o cartão associado é libertado para que outro trabalho possa ser lançado em produção, de forma a repor o *stock* ou, no caso de MTO, a autorizar o lançamento em produção de um novo trabalho ou parte, dependendo da capacidade reservada pelo cartão CONWIP.

O CONWIP tem sido alvo do estudo de diversos autores. Bonvik, Couch e Gershwin (1997) comparam o desempenho do CONWIP com o TKS e com o *Two-boundary Control System*, uma hibridação entre o CONWIP e o TKS. Framinan, González e Ruiz-Usano (2003) fazem uma revisão da literatura relacionada com o CONWIP que envolva estudos da sua forma de operação, aplicação em diferentes ambientes de produção e comparação do CONWIP com outros mecanismos . Mais recentemente, Prakash e Chin (2014) fazem uma revisão e classificação de mecanismos adaptados do CONWIP relatados na literatura.

O POLCA (Suri, 1998) é um mecanismo de CAP híbrido geralmente aplicado à produção por encomenda. Este combina as melhores características do MRP e do TKS o que permite a sua aplicação em ambientes de produção com elevada variabilidade e/ou produtos costumizáveis (Krishnamurthy e Suri, 2009). Outros mecanismos baseados no POLCA são o E-POLCA (Vandaele et al. 2005), *Generic* POLCA (Fernandes e Carmo-Silva, 2006) e *Load Based* POLCA (Vandaele et al. 2008).

Outros mecanismos baseados em cartões que podem ser encontrados na literatura são o *Behaviour-based Control* – BBC (Paternina-Arboleda e Das, 2001), o *Bottleneck Oriented Card-based* (Aziz et al, 2013) e o *Control of Balance by Card-based Navigation* - COBACABANA (Land, 2009).

A grande maioria dos mecanismos de CAP baseados em cartões foram desenvolvidos para serem aplicados em ambiente de produção com pouca variedade de produtos e para que o tempo de resposta ao pedido dos clientes fosse praticamente imediato, o que pressupõe a existência de stocks

de produtos acabados e/ou intermédios, i.e., em fase de fabrico, e a sua reposição logo após o consumo.

É de realçar a tentativa de fundir duas abordagens ao CAP, nomeadamente a filosofia JIT e o WLC, inerente ao mecanismo GPOLCA que, aparentemente pode fazer dele um mecanismo atrativo para uso prático em produção por encomenda, i.e., MTO.

Devido à sua popularidade, adequação e adaptabilidade à produção MTO, e tendo em conta os objetivos deste trabalho que no essencial pretende comparar mecanismos com ou sem cartões para o CAP em ambiente MTO, foram escolhidos para análise e estudo os mecanismos CONWIP, GPOLCA e o GKS. Por esse facto estes mecanismos são discutidos em mais detalhe na próxima secção.

4.2 Modo de operação

4.2.1 CONWIP - Constant Work in Process

O CONWIP é um mecanismo que utiliza cartões de produção que servem para dar autorização de lançamento de novos trabalhos para a produção. No CONWIP (ver Figura 2) os cartões são atribuídos à linha de produção ou sistema produtivo, não sendo específicos de qualquer artigo a produzir. Os cartões são alocados aos trabalhos aquando do seu lançamento em produção e acompanham-no durante todo o seu processamento. À medida que os trabalhos são concluídos ou expedidos para o cliente, os cartões são dissociados destes e enviados para o início da linha, para que possam ser alocados a novos trabalhos a lançar em produção. O CONWIP pode ser usado na produção para *stock* ou na produção por encomenda. Na produção para *stock* o cartão CONWIP é enviado para o início da linha quando um produto acabado é retirado do *stock*, autorizando a liberação de um novo trabalho de forma a repor *stock* consumido, contanto que todas as matérias-primas estejam disponíveis. Na produção por encomenda, além de continuarem a ser os cartões a autorizar produção, existe também uma *pre-shop pool* onde os trabalhos aguardam o seu lançamento, que indica que artigos ou ordens de fabrico estão à espera de ser lançados em fabrico com informação necessária de processamento, i.e. tempos de processamento esperados, roteiro de fabrico, etc. Portanto aqui não há reposição de *stock*, e quando um trabalho termina a sua produção liberta o cartão para permitir a entrada de um novo. Por isso o cartão CONWIP é libertado logo que o processamento do artigo termina, i.e. antes mesmo de ser levantado ou expedido para o cliente.

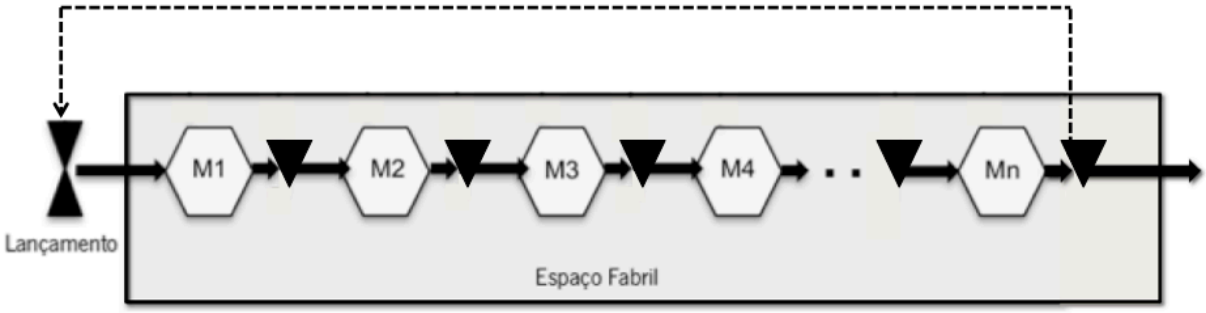

Figura 2 - Modo de operação do mecanismo CONWIP

4.2.2 GPOLCA – Generic POLCA

No GPOLCA (ver Figura 3) os cartões são atribuídos a pares de centros de trabalho e não à linha ou sistema produtivo, como acontece no CONWIP. O GPOLCA foi desenvolvido para a produção por encomenda. Assim os trabalhos aguardam numa *pre-shop pool* pelo seu lançamento para o espaço fabril. Um trabalho só é lançado se existir pelo menos um cartão por cada par de centros que lhe possa ser alocado. Os cartões são alocados aos trabalhos aquando do seu lançamento em produção e acompanham-no durante o seu processamento até ao último centro de trabalho do par a que pertencem. Quando um cartão é dissociado do trabalho, este fica disponível para ser utilizado por novos trabalhos, desde que os novos trabalhos sejam processados no mesmo par de centros, uma vez que os cartões são específicos de pares de centros de trabalho.

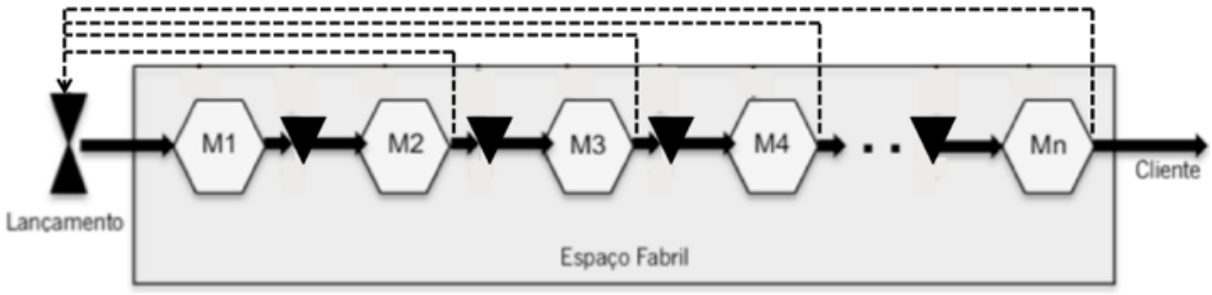

Figura 3 - Modo de operação do mecanismo GPOLCA

Para que um trabalho possa ser lançado no sistema há, para além dos cartões, algumas restrições:

- Para cada trabalho que exista na *pool*, é calculada uma data planeada de lançamento no sistema através de uma programação regressiva, partindo da data de entrega e subtraindo os *lead times* em cada centro trabalho por onde este passa.
- Os trabalhos são considerados para lançamento de acordo com a sua data planeada de lançamento: aqueles que tiverem uma data de lançamento mais cedo, são eventualmente

lançados primeiro desde que haja cartões suficientes. Doutra forma será considerado para lançamento o trabalho a seguir, e assim sucessivamente, até que não haja mais cartões para permitir lançamentos ou mais trabalhos na *pool*.

4.2.3 GKS – Generic Kanban System

No GKS (ver Figura 4) os cartões são específicos de centros de trabalho. A cada centro é disponibilizado um determinado número de cartões. Assim, para que um trabalho seja lançado em produção é necessário que esteja disponível pelo menos um cartão por centro de trabalho para lhe ser alocado. Os cartões são alocados aos trabalhos aquando do seu lançamento em produção e acompanham-no durante o seu processamento até ao centro de trabalho a que pertencem. Quando um trabalho acaba de ser processado num CT, os respetivos cartões são dissociados, ficando disponíveis para serem alocados a um novo trabalho. Quando não há cartões suficientes para a entrada de novos trabalhos, o seu lançamento fica impedido até que novos cartões, em número suficiente, fiquem disponíveis.

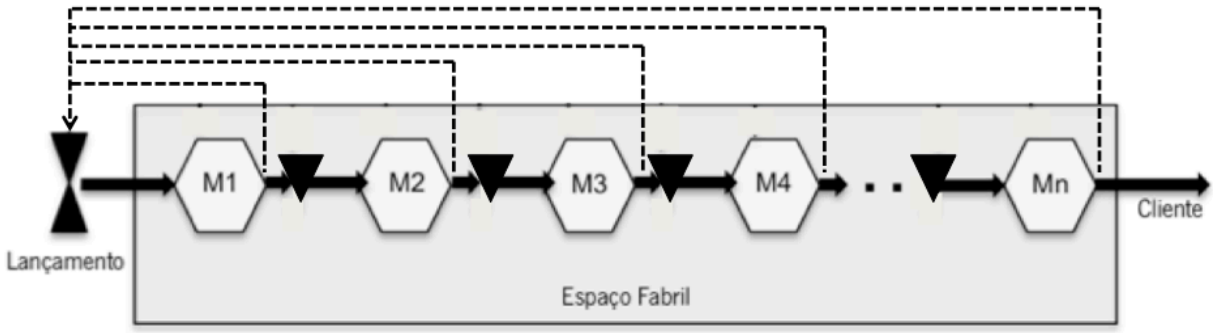

Figura 4 - Modo de operação do mecanismo GKS

4.3 Dimensões de caracterização

O texto desta secção foi desenvolvido com base em "Aulas e Slides das Aulas de Sistemas de Controlo da Atividade Produtiva, do Mestrado em Engenharia de Sistemas, da Universidade do Minho, do ano letivo de 2012-13" (Carmo-Silva, 2013).

Através das dimensões de caracterização é possível de forma sistemática identificar as diferenças existentes entre os mecanismos de CAP baseados em cartões. Estas permitem classificar os mecanismos, eventualmente facilitando a escolha do mais adequado ao um determinado ambiente produtivo, pois descrevem as características e as propriedades fundamentais de cada.

Para esta classificação de mecanismos baseados em cartões consideram-se as seguintes dimensões:

- Paradigma de reposição
- Abordagem ao CAP
- Ambiente de produção para satisfação da procura
- Configuração do sistema de produção
- Paradigma de autorização de produção
- Afetação dos cartões/kanbans
- Informação dos cartões/kanbans
- Número de *loops* ou malhas de controlo

4.3.1 Paradigma de reposição

Do ponto de vista do Controlo da Produção, Carmo-Silva (2013) considera que os cartões de controlo traduzem um processo de reposição. Nesta variável pode identificar-se a **reposição de carga** que se identifica nos mecanismos em que quando um produto é concluído a carga do sistema associada baixou e é necessário repor a carga de trabalho no sistema para manter o sistema alimentado. Por outro lado existe a **reposição de stock** onde existe uma indicação imediata do consumo ou levantamento de um produto e é dada a ordem de para fazer a mesma quantidade de artigo para repor o que foi consumido.

4.3.2 Abordagem ao CAP

Quanto às abordagens ao Controlo da Atividade Produtiva, podem identificar-se as seguintes (já referidas anteriormente na secção 2.4): MRP, WLC, JIT, TOC e QRM.

No essencial o MRP é uma abordagem que determina o que deve ser produzido, em que quantidades e quando, com base nas encomendas recebidas e nas previsões de procura futuras. Na abordagem de Controlo de Carga (WLC), apropriada à produção MTO, as encomendas recebidas aguardam numa *pool* e o seu lançamento para o espaço fabril é autorizado com base na quantidade de carga presente no EF. A filosofia JIT funciona com vista à eliminação de desperdícios defendendo que deve ser produzido apenas o necessário no momento certo: o objetivo é reduzir custos com gastos desnecessários. Por isso na abordagem JIT geralmente as autorizações de produção resultam de um

processo de reposição de *stocks* em quantidades pequenas e controladas. Na abordagem baseada na Teoria das Restrições (TOC) a produção é feita de forma a rentabilizar ao máximo a produção no CT *bottleneck*, i.e., o CT crítico, sendo este que define a taxa de produção no sistema, de forma a obter o máximo de rentabilização. Portanto este centro controla as entradas no sistema de forma a assegurar a sua permanente e ininterrupta utilização. O QRM procura reduzir os tempo de resposta aos pedidos através da redução dos *lead times*, internos e externos, procurando ao mesmo tempo garantir melhorias na qualidade e redução de custos.

4.3.3 Ambiente de produção para satisfação da procura

Como ambiente de satisfação da procura pode identificar-se a Produção para Stock - *Make-to-Stock* (MTS), Produção por Encomenda - *Make-to-Order* (MTO), Montagem por Encomenda - *Assemble-to-Order* (ATO) e Engenharia por Encomenda - *Engineering-to-Order* (ETO).

Num ambiente **MTS**, os produtos são exclusivamente desenhados e concebidos pelo fabricante. A produção é feita de forma repetitiva e baseada principalmente em previsões da procura. As encomendas são normalmente satisfeitas com base no *stock* de produtos acabados existente, que é controlado de forma a evitar roturas, i.e. manter os níveis de serviço elevados, tendo em conta as previsões da procura. Em MTS, a contribuição direta dos clientes para o projeto dos produtos é muito pequena ou inexistente. Os sistemas MTS têm como principal vantagem a rapidez na entrega dos produtos, mas os custos com *stocks* tendem a ser grandes num ambiente de procura incerta e grande variedade de produtos, sendo por isso uma forma de produção não recomendada para tal ambiente.

Uma alternativa é produzir em modo **MTO**, onde os artigos a produzir são estritamente aqueles que são encomendados, em quantidade e referência, podendo ser de catálogo ou customizados de acordo com as alternativas oferecidas pelos fabricantes e preferências do cliente. Em casos extremos o produto é totalmente especificado pelo cliente, não só na sua funcionalidade como também na natureza dos materiais empregues; diz-se que estamos perante a variante de MTO designada de Engenharia por Encomenda, i.e., *Engineering-to-Order* (**ETO**). Na produção MTO a entrega não é imediata, dependendo dos tempos de entrega e do processo de fabrico, sendo a produção normalmente iniciada apenas após a confirmação da encomenda.

Além de ETO como variante do MTO uma outra variante é a montagem por encomenda i.e. *Assembly to Order* (**ATO**). Com ATO a produção é feita com base em stocks de componentes e/ou módulos que são montados após o pedido de encomenda do cliente contendo as especificações do produto final.

Portanto o ambiente ETO é visto como uma extensão do MTO onde o projeto do produto é feito baseado na especificação completa do produto por parte do cliente. Enquanto que o ATO é uma restrição que tira partido parcial da abordagem MTS através da especificação final do produto produzido a partir de uma base comum de componentes complementada com variantes e opções ou customização ao nível da montagem.

4.3.4 Configuração do sistema de produção

A configuração do sistema de produção, refere-se à forma como o sistema de produção está fisicamente configurado, configuração essa que envolve os meios principais relevantes de produção, i.e., humanos e de equipamentos. Como duas grandes classificações distintas existem as linhas de produção (*Flow Shops* – FS) e as oficinas de produção (*Job Shops* – JS).

Numa FS existe um fluxo com um sentido único de fluxo de trabalho e materiais e os centros de trabalho são dispostos em linha de acordo com a sequência das operações. As FS dividem-se em linha de produção pura (***Pure Flow Shop* – PFS**) onde os trabalhos são obrigatoriamente processados em todos os centros de trabalho pela mesma ordem, e linha de produção geral (***General Flow Shop* – GFS**) onde os trabalhos devem ser executados de forma sequencial mas podendo ultrapassar alguns centros de trabalho. Nas **Job Shops (JS)** o fluxo de produção é multidirecional, não condicionado, o que quer dizer que os trabalhos podem iniciar-se e terminar em qualquer CT, de acordo com a sua gama operatória, e movimentar-se de uns centros de trabalho para outros sem restrições, i.e., em qualquer ordem. As FS são frequentemente associadas à produção para stock (MTS) e são simples de implementar, enquanto que as JS são geralmente associadas à produção por encomenda (MTO) e são mais complexas.

4.3.5 Paradigma de autorização de produção

Em relação ao paradigma de autorização de produção, os mecanismos podem ser designados de *push* ou *pull* como referem vários autores, e.g. Tayur (1993). Nos mecanismos que usam um paradigma ***push***, a produção pode ser iniciada sempre que os materiais, i.e. matérias-primas e ou produtos intermédios ou em fase de transformação, destinados a satisfazer encomendas ou um programa de produção, estão disponíveis para serem processados, independentemente dos níveis de *stock* nos centros de trabalho seguintes. Nesta estratégia ao concluir-se um trabalho, este é empurrado para o próximo centro de trabalho e deste para os seguintes, até que sejam executadas todas as operações.

Já no paradigma ***pull***, um determinado CT é mantido parado, mesmo se existir material a processar, até que os centros de trabalho seguintes, que vão continuar o processamento, deem autorização para se iniciar o fornecimento, o que despoleta a produção para reposição.

Além destes dois paradigmas podemos identificar mecanismos que têm ao mesmo tempo características *pull* e *push*, que são chamados **híbridos** pull-push.

4.3.6 Afetação dos cartões/kanbans

Os mecanismos baseados em cartões normalmente atribuem cartões aos trabalhos para os acompanhar durante o seu processamento. Estes, dependendo do mecanismo e relativamente ao controlo no espaço fabril, podem ser considerados como estando afetados ao **sistema**, a um **CT** ou a um **par de CTs**. Quanto ao artigo estes podem ser afetados a um **artigo específico** ou a **qualquer artigo**.

4.3.7 Informação dos cartões/kanbans

Sendo os mecanismos a caracterizar baseados em cartões é importante identificar a informação que os cartões de produção contêm ou lhe está associada em cada mecanismo analisado. Dependendo do mecanismo a informação contida em cada cartão é relevante para o controlo do fluxo de materiais no espaço fabril. Através desta dimensão vamos associar a cada mecanismo a informação que cada cartão possui. Assim esta pode indicar:

- CT produtor e/ou CT consumidor do trabalho a que o cartão está afetado
- Quantidade de artigo a produzir associada a cada cartão
- Tipo de artigo a ser produzido
- Tempo de produção/carga associada a cada cartão
- Identificação do cartão através de um código ou número
- Indicação de quantos mais cartões existem no sistema do mesmo tipo.

4.3.8 Número de loops

Um *loop* é uma malha de controlo associada ao fluxo de cartões através dos diversos centros de trabalho com que se relaciona. O *loop* condiciona o número de trabalhos que se pode encontrar nos

centros de trabalho que fazem parte dele. Numa linha de produção com n fases de produção, geralmente associadas a n centros de trabalho, o comprimento da malha pode variar entre 1 e n, i.e. pode abranger um número de centros de trabalho variável de 1 até n.

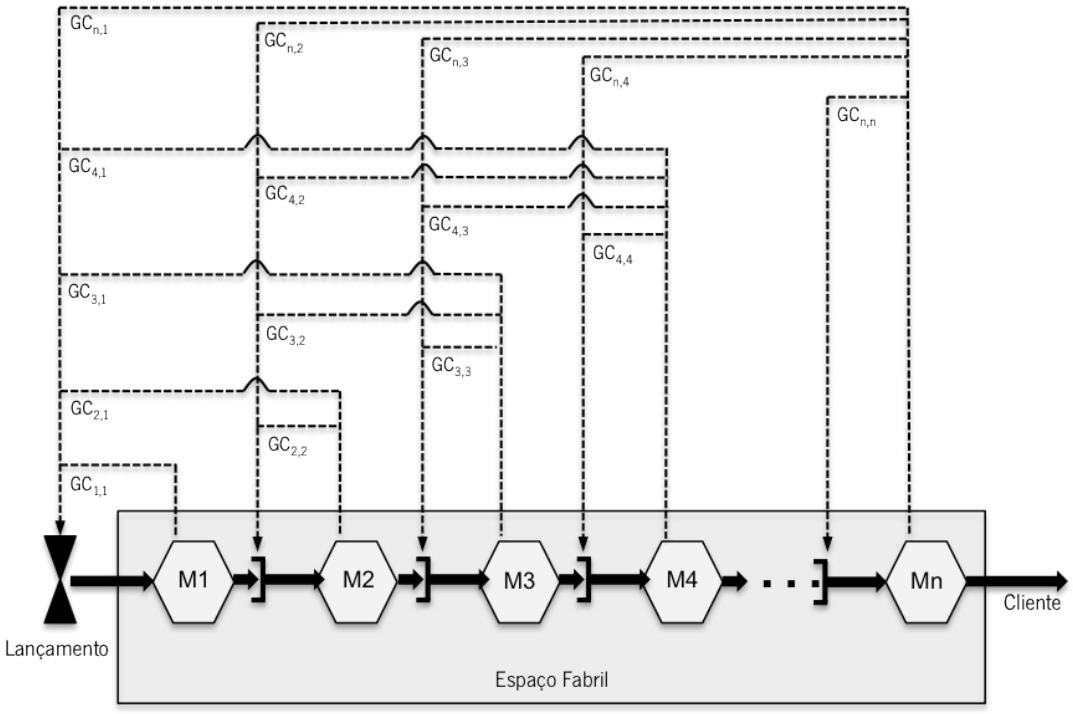

Figura 5 - Malhas de controlo de mecanismos baseados em cartões (Adaptado de: Fernandes e Carmo-Silva, 2005)

Cada malha possível de obter com n centros de trabalho está identificada na Figura 5 como um Grupo de Capacidade (GC). Um GC é um conjunto de recursos (máquinas, centros de trabalho, estágios de produção, etc.) ao qual se pode associar um limite de cartões para servir como fator de controlo desse grupo de capacidade. Os mecanismos que são possíveis representar diferem nos GC que são necessários controlar, i.e., aqueles para os quais é definido um número de cartões. Quando não está definido um número de cartões para um GC é atribuído um valor infinito (∞), o que significa que para esse GC não é feito controlo do limite de trabalhos e portanto este não influencia o lançamento dos trabalhos nem o fluxo dos materiais no EF.

A Figura 5 mostra o número de malhas associadas aos mecanismos CONWIP, GPOLCA, GKS, TKS e POLCA, sendo possível fazer a parametrização genérica (para uma *flow shop*) apresentada nas equações 2, 3, 4, 5 e 6. GC_{ij} corresponde ao *loop* do CT i com o CT j, onde i e j variam entre 1 e n. $C \in \mathbb{N}^*$ corresponde ao limite de cartões definido em cada malha de controlo, podendo ter um valor diferente para cada malha de controlo. Sendo $L(GC_{ij})$ o número de cartões a usar para GC_{ij}:

- CONWIP $$L(GC_{i,j}) = \begin{cases} C, & se \quad i = n \quad e \quad j = 1 \\ \infty, & senão \end{cases} \quad (2)$$

- GPOLCA $$L(GC_{i,j}) = \begin{cases} C, & se \quad j = 1 \quad e \quad i \neq 1 \\ \infty, & senão \end{cases} \quad (3)$$

- GKS $$L(GC_{i,j}) = \begin{cases} C, & se \quad j = 1 \quad e \quad i \in [1..n] \\ \infty, & senão \end{cases} \quad (4)$$

- TKS $$L(GC_{i,j}) = \begin{cases} C, & se \quad i = j \\ \infty, & senão \end{cases} \quad (5)$$

- POLCA $$L(GC_{i,j}) = \begin{cases} C, & se \quad i - j = 1 \\ \infty, & senão \end{cases} \quad (6)$$

Por exemplo, no CONWIP (equação 2) quando $n = 6$ é apenas definido limite de cartões para $GC_{6,1}$, o que significa que é feito um controlo do fluxo de materiais entre o CT1 e CT6 (tal como está ilustrado na Figura 6). Também num exemplo para $n = 6$ no TKS (equação 5), os GC nos quais é definido limite de cartões são neste caso: $GC_{1,1}$, $GC_{2,2}$, $GC_{3,3}$, $GC_{4,4}$, $GC_{5,5}$ e $GC_{6,6}$ (tal como está ilustrado na Figura 7).

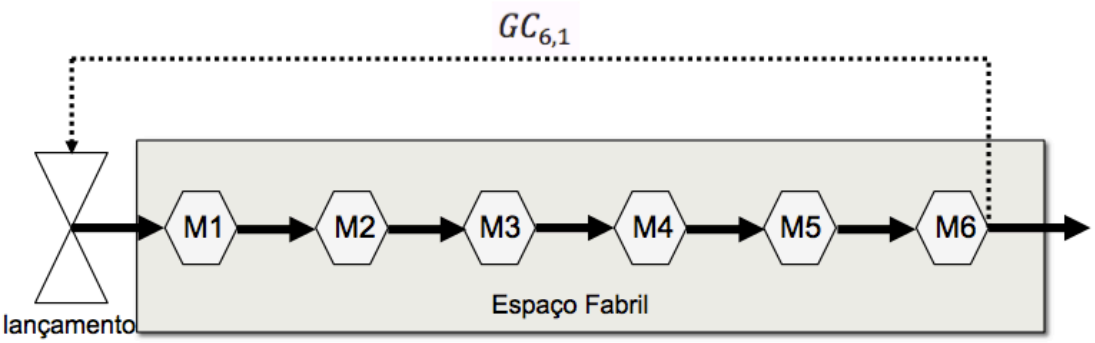

Figura 6 - Representação da malha de controlo do CONWIP com 6 estágios de produção

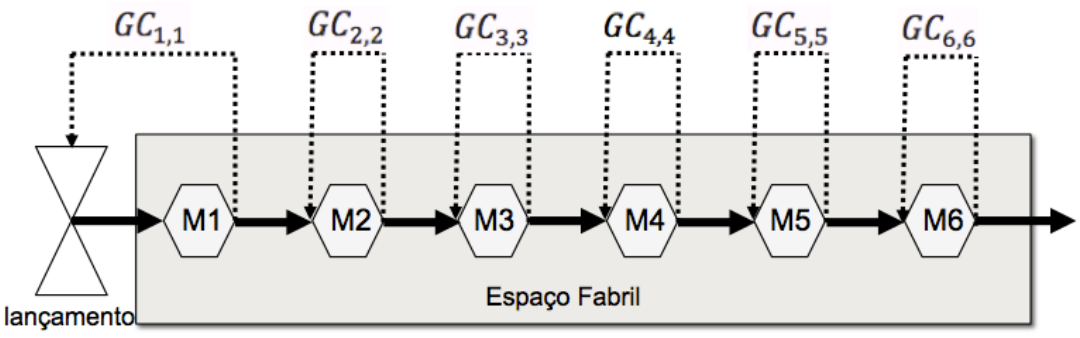

Figura 7 - Representação das malhas de controlo do TKS com 6 estágios de produção

4.3.9 Caracterização dos mecanismos

Depois de apresentadas as dimensões de caracterização, a Tabela 2 relaciona os mecanismos a caracterizar com as estratégias de cada uma destas. Na Tabela 2 o símbolo X significa que o mecanismo é aplicável a essa estratégia.

Tabela 2 - Comparação das características dos mecanismos

Dimensões de caracterização	Estratégias	Mecanismos				
		CONWIP	GPOLCA	GKS	TKS	POLCA
Paradigma de reposição	Reposição de carga	X	X	X		X
	Reposição de stock	X			X	
Abordagem ao CAP	MRP					
	WLC		X	X		
	JIT	X			X	
	TOC					
	QRM					X
Ambiente de produção para satisfação da procura	MTS	X			X	
	MTO	X	X	X		X
	ATO	X	X	X		X
	ETO	X	X	X		X
Configuração do sistema de produção	PFS	X	X	X	X	X
	GFS	X	X	X	X	X
	JS	X	X	X	X	X
Paradigma de Autorização da Produção	Push					
	Pull				X	X
	Híbrido	X	X	X		
Afetação dos cartões/kanbans	Artigo específico				X	
	Qualquer artigo	X	X	X		X
	Sistema	X				
	CT			X	X	
	Pares de CT		X			X
Informação dos cartões/kanbans	CT produtor		X	X	X	X
	CT consumidor		X		X	X
	Quantidade de artigo que representa	X		X	X	
	Referência do artigo				X	
	Tempo de produção (carga)	X	X	X		X
	Quantidade de cartões disponível				X	
	N° do cartão				X	

O CONWIP faz reposição tanto de carga como de *stock*. A sua simplicidade de aplicação permite que seja aplicado tanto em ambiente MTS como em ambiente MTO. Quando aplicado para a produção MTS é de reposição de *stock*, quando aplicado à produção MTO é de reposição de carga, no entanto esta é feita de forma indireta por ser feita com base no número de trabalhos. O TKS é um mecanismo com

uma abordagem JIT porque funciona requisitando o material necessário nas quantidades certas apenas no momento em que é necessário produzir, e ao mesmo tempo garante que as entregas ao cliente sejam atempadas. GKS, POLCA e GPOLCA são mecanismos de reposição de carga. Pelo facto de utilizarem cartões de produção estes fazem com que a carga do sistema seja reposta controlando de forma simples e sem necessidade de monitorização, não só a carga admissível no sistema mas também o lançamento das ordens de produção. Por serem considerados como mecanismos que fazem reposição de carga, estes podem ser classificados como utilizando uma abordagem WLC. No entanto, o GPOLCA fá-lo de forma explicita e direta, aplicando a teoria do WLC, enquanto que o POLCA fá-lo apenas por via do paradigma de reposição de carga. O POLCA surgiu como um mecanismo que pretende cumprir os princípios definidos pela abordagem QRM apresentada por Suri (1998).
O CONWIP apesar de ser geralmente referido para aplicação em sistemas do tipo linha de fabrico, ou *flow shop*, pode também ser aplicado a diferentes configurações do EF, incluindo JS (Framinan, González, Ruiz-Usano, 2003). Por ser um mecanismo simples e flexível o CONWIP é um mecanismo com facilidade na aplicação em vários ambientes de satisfação da procura, pois permite mudanças na produção e o processamento de diferentes tipos de produto. Os seus cartões definem a carga no sistema e não em nenhum centro de trabalho particular.

O TKS é desenhado para produção para *stock* e entrega imediata ao consumidor da quantidade pedida. O ambiente em que geralmente é aplicado é a *flow shop*, pura ou geral, devido à sua utilização em ambientes orientados ao produto, geralmente organizados naquelas duas configurações.

O GKS foi proposto por Chang e Yih(1994) como um mecanismo flexível e robusto para a produção por encomenda de grande variedade de artigos. A lógica do GKS é portanto algo oposta ao TKS.

O POLCA e o GPOLCA são desenhados para a produção por encomenda, e variações desta como ETO e ATO, assim como o GKS. No entanto a abordagem de controlo é baseada em pares sucessivos de centros de trabalho, identificados nos cartões, permitindo uma clara definição das rotas de fabrico, o que não acontece com o GKS que necessita de informação complementar a este respeito para encaminhar os trabalhos no EF. A diversidade de artigos não é um problema nem os roteiros necessários para os fabricar, razão pela qual mesmo em ambientes JS estes podem ser aplicados.

Quanto ao paradigma de autorização de produção, o CONWIP implementa um paradigma híbrido, ou seja, é *pull* porque o cartão libertado no fim do sistema, puxa novas ordens de produção para o sistema para iniciar nova produção que depois é empurrada (*pushed*) até fase final de produção. O TKS é *pull* porque é o consumo de artigos em cada CT que faz com que um novo trabalho seja

processado. Já o GKS e o GPOLCA são mecanismos híbridos, pois assim que os trabalhos são libertados para o EF, sendo puxados pelos cartões que se vão disponibilizando, são depois empurrados do primeiro CT da ordem de fabrico sucessivamente para os seguintes, i.e., em modo *push*. O POLCA implementa uma abordagem *pull* próxima da do TKS. Sendo que a autorização num CT provém do CT consumidor, numa lógica de reserva de capacidade deste para aceitar o trabalho que lhe vai ser fornecido a pedido e não de reposição de stock.

Quanto à afetação dos cartões em cada mecanismo uns são específicos do artigo enquanto outros são genéricos, i.e. aplicáveis a qualquer artigo. No TKS cada *kanban* refere-se a um e um só artigo específico ou referência. No CONWIP, GKS, GPOLCA e POLCA os cartões não são específicos do produto podendo ser atribuídos a qualquer artigo ou trabalho a processar no sistema.

Quanto às unidades organizacionais de fabrico que cada cartão controla ou está afeto no EF, no CONWIP os cartões são pertencentes ao sistema e são atribuídos quando o trabalho entra no sistema e só são libertados depois do trabalho ser concluído. No TKS e GKS o cartão pertence ao CT, i.e. cada CT tem a si associados cartões e estes não podem ser utilizados noutros centros de trabalho. No caso do POLCA e GPOLCA os cartões pertencem a pares de CTs e só podem ser utilizados nos CTs a que correspondem.

Relativamente à informação que cada cartão de produção contém ou tem associada, o *kanban* do TKS apresenta toda a informação necessária ao encaminhamento e produção ou levantamento, para consumo, do artigo. Atua como uma requisição de materiais ou ordem de produção totalmente autónoma, sem necessidade de mais documentos ou fontes de informação. Claramente esta abordagem seria incompatível em ambiente de grande variedade de artigos e grande variação da procura. Portanto, toda a informação respeitante à identificação do artigo e local onde é produzido e onde se recolhem as matérias primas ou trabalhos em curso para transformar, reside no cartão, incluindo as quantidades de artigo a produzir e a levantar para processamento. Os restantes mecanismos têm nos seus cartões de produção pouca ou nenhuma informação. O cartão GKS pode não ter nada escrito, devendo no entanto nele estar identificado o CT a que pertence. No entanto a carga que representa tem de ser conhecida já que o número de cartões afetado a uma ordem de produção depende da carga associada a esta ordem. A este respeito, o mesmo acontece com o GPOLCA.

A comparação entre estes mecanismos permite verificar as diferenças e/ou semelhanças entre eles. Verifica-se através da Tabela 2 que o GKS, POLCA e GPOLCA são mecanismos com algumas

semelhanças, embora o POLCA tenha um paradigma de autorização de produção diferente do dos GPOLCA e GKS. O TKS apresenta-se entre estes como o mecanismo mais limitado em termos de aplicação, sendo o menos flexível. O CONWIP é o aposto, por ser mais simples pode ser adaptável a várias situações.

Podemos concluir que, apesar de encontramos semelhanças, os mecanismos de CAP são muito diferentes na seu modo de funcionamento e forma como implementam o controlo de produção e do fluxo de materiais.

5. ESTUDO EXPERIMENTAL DOS MECANISMOS DE CAP

5.1 Enquadramento do estudo

Neste capítulo alguns mecanismos de CAP, para produção por encomenda, são estudados e o seu desempenho comparado usando a simulação por computador.

Os mecanismos de CAP baseados em carga são particularmente apropriados a ambientes de produção complexos geralmente associados à produção por encomenda, onde existe grande diversidade de produtos com requisitos de processamento diversificados. Os mecanismos baseados em cartões para este ambiente só recentemente começam a ser considerados como instrumentos úteis de CAP na prática.

Os mecanismos de CAP baseados em cartões foram originalmente desenvolvidos para a produção repetitiva em ambiente de reposição de *stock*. Estes e outros mecanismos baseados em cartões têm a sua grande vantagem na simplicidade com que implementam o CAP e sem necessidade sistemas de aquisição de dados, manuais ou eletrónicos, sobre o progresso das ordens de produção. Contudo as virtudes, vantagens e desvantagens e modos de aplicação de mecanismos de cartões ao CAP em produção por encomenda não são bem conhecidas. Desta forma é relevante analisar estas dimensões, em relação a mecanismos existentes e com vista à sua aplicação prática e compreender o impacto das alternativas de implementação possíveis. Estas questões são abordadas neste trabalho com foco em parâmetros de relevância que permitem configurar os mecanismos, isto é adaptá-los para utilização prática, e fazer um estudo comparativo do seu comportamento ou desempenho em ambiente de produção por encomenda.

Tradicionalmente, nos mecanismos baseados em cartões, em geral cada cartão representa um trabalho (que pode ser um contentor de artigos a transformar num CT) sendo tipicamente atribuído a cada trabalho um cartão por cada estágio ou fase de produção. Contudo, na produção por encomenda onde os tempos de processamento dos trabalhos são bastantes variáveis, um cartão não permite uma representação precisa da carga dos trabalhos. Para resolver este problema, deverá haver um *quantum* de carga que cada cartão represente, i.e., o cartão não pode representar a carga total do trabalho, mas apenas parte desta. Portanto poderá ser necessário atribuir mais de um cartão a um trabalho, dependendo da sua carga. Por exemplo, assumindo que cada cartão representa uma carga de uma

hora, se a afetação de cartões se fizer na base de centros de trabalho, um trabalho que esteja para ser lançado e que tenha um tempo de processamento de cinco horas num determinado centro de trabalho necessita de cinco cartões desse centro para poder ser lançado. Portanto, a quantidade de carga que cada cartão representa deve ser definida previamente.

No trabalho experimental este *quantum* de carga é definido, mantendo-se a lógica de funcionamento dos mecanismos. Para poder implementar os mecanismos é definido um número de cartões a atribuir a cada *loop*, representando o limite de carga que pode ser lançada para esse *loop*. O trabalho só pode ser lançado se tiver todos os cartões necessários de todos os *loops*, de acordo com o seu roteiro de fabrico. No momento em que o trabalho conclui o seu processamento num *loop*, os cartões são removidos do trabalho e enviados de volta para o lançamento onde podem ser atribuídos a outro trabalho em espera na PSP.

Assim no âmbito das próximas seções além de se estudar o desempenho dos mecanismos baseados em cartões, e de se comparar o seu desempenho com o desempenho dos mecanismos baseados em carga, investiga-se também o impacto da carga que cada cartão representa no desempenho dos mecanismos baseados em cartões.

De forma a estudar o desempenho dos mecanismos baseados em cartões e dos refinamentos acima sugeridos, foi desenvolvido um modelo de simulação usando a ferramenta Arena®. Assim, nas próximas secções deste capítulo começa-se por fazer uma descrição do ambiente de simulação e das medidas de desempenho estudadas e da sua importância. De seguida o estudo de experimentação é apresentado em três fases. Primeiro estudando o desempenho dos mecanismos CAP baseados em cartões num ambiente MTO, de seguida estudando o desempenho dos mecanismos CAP baseados em carga e, por último, comparando o desempenho de ambos os mecanismos, i.e. baseados em cartões e baseados no controlo de carga. Para cada fase da experimentação é apresentado o plano experimental e os resultados obtidos e é feita uma análise desses resultados.

5.2 Ambiente de simulação e medidas de desempenho

O estudo é baseado num sistema de produção com uma configuração em linha constituído por seis estágios ou fases produtivas, ou centros de trabalho, cada um com uma única máquina (Figura 8).

O tempo entre chegadas ao sistema de encomendas ou ordens de produção, aqui também designadas por trabalhos, segue uma distribuição exponencial de média 1,1 unidades de tempo e.g., horas. Isto

garante uma taxa de utilização média de cada máquina em cerca de 90%, face aos tempos de serviço ou processamento. Os tempos de processamento dos trabalhos em cada máquina seguem uma distribuição 2-*Erlang* truncada com média de uma unidade de tempo e máximo de quatro unidades de tempo.

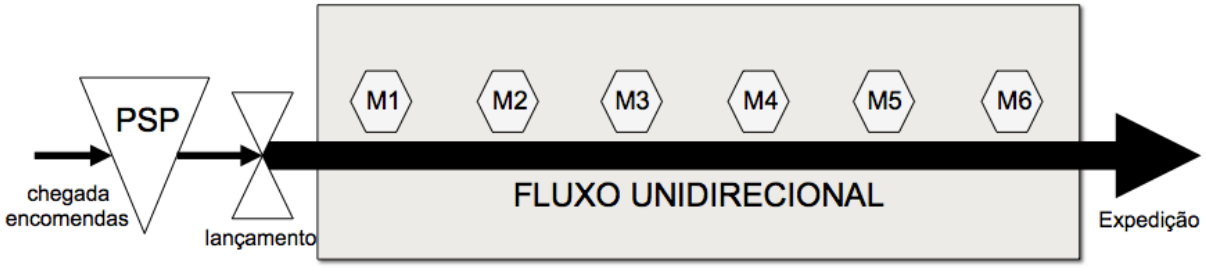

Figura 8 - Ambiente de simulação do estudo experimental

Os seguintes pressupostos foram assumidos:

- Todas as encomendas são aceites e o material e a informação necessária estão disponíveis ou são conhecidos;
- A capacidade das máquinas é constante e as máquinas estão continuamente disponíveis;
- Os tempos de *setup* estão incluídos nos tempos de processamento e são independentes da sequência de processamento;
- As distâncias e tempos de deslocação entre os estágios produtivos não são considerados.

Ao chegar ao sistema, é atribuída uma data de entrega a cada encomenda, seguindo de imediato para uma *pre-shop pool* (PSP) onde fica a aguardar o seu lançamento para o espaço fabril (EF). Na PSP os trabalhos são ordenados segundo uma regra de sequenciação para efeito de lançamento. Diferentes regras são estudadas neste âmbito. A data de entrega (DE) é definida da seguinte forma:

$$DE = Tc + Unif(40,60) \tag{7}$$

Onde Tc representa o tempo em que a encomenda chega ao sistema produtivo e $Unif(40,60)$ é um valor obtido através de uma distribuição uniforme de mínimo 40 e máximo de 60 unidades de tempo (horas). Isto simula a definição de datas de entrega exogenamente, e.g. pelo cliente.

Os trabalhos aguardam na PSP por autorização para serem lançados. A partir do momento em que o trabalho é lançado para o EF a sequenciação dos trabalhos em cada estágio de produção é feito seguindo a regra *earliest Planned operation Starting Time* (PST), a qual dá prioridade ao trabalho mais urgente. O valor de PST de um trabalho j na máquina m é obtido da seguinte forma:

$$PST_{tm} = d_t - \sum_{n \in S_{jm}} T_n \quad (8)$$

Onde S_{jm} corresponde ao conjunto composto pela máquina m e as máquinas que estão a jusante do trabalho t, i.e., que subsequentemente fazem parte da rota de fabricação da encomenda, T_n é o *lead time* planeado para o estágio produtivo n, e d_t é a DE definida para o trabalho t.

Para estudar o desempenho dos mecanismos no ambiente acima descrito foram realizadas 100 replicações, cada uma com um tempo de simulação de 13000 unidades de tempo, o qual incluiu um período de aquecimento, *warm-up*, de 3000 unidades de tempo.

As medidas de desempenho analisadas são as seguintes:

- Tempo em curso no Espaço Fabril (TEF), que é o tempo médio que decorre entre o lançamento do trabalho em produção até ser concluído;
- Percentagem de trabalhos atrasados (P_{tardy}), i.e. percentagem de trabalhos que são entregues após a DE estabelecida para cada um;
- Desvio Padrão dos atrasos ($SD_{lateness}$), que mede a dispersão do *atraso* entre os trabalhos, sendo que o *atraso* é obtido através da diferença entre data em que o trabalho é concluído e a DE.

5.3 Desempenho dos mecanismos baseados em cartões

Nesta secção procura-se avaliar o desempenho de três mecanismos CONWIP, GPOLCA E GKS, e perceber em que medida a parametrização sugerida na secção 5.1 contribuiu para um melhor desempenho destes mecanismos. A experimentação foi feita para uma linha de produção pura - *Pure Flow Shop* (PFS).

5.3.1 Plano de experimentação

A Tabela 3 apresenta os fatores de experimentação e níveis em que estes são testados.

Tabela 3 - Fatores de experimentação e níveis para a experimentação baseada em cartões

Fator de Experimentação	Níveis		
Mecanismo de CAP	CONWIP	GPOLCA	GKS
Regra de sequenciação na PSP	PRT	FIFO	SPT
Amplitude do cartão (% de carga)	0-100%	0-33%	0-20%
Metodologia de definição dos cartões	A	B	
Número de cartões por loop	Testado a 8 níveis		

O primeiro fator experimental, mecanismo de CAP, é testado a três níveis. A descrição destes foi apresentada na secção 4.2. Os mecanismos são:

- CONWIP (*Constant Work in Process*);
- GPOLCA (*Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*);
- GKS (*Generic Kanban System*).

O segundo fator experimental, regra de sequenciação na PSP, é também testado a três níveis, nomeadamente:

- PRT (*planned release time*) – os trabalhos são ordenados de acordo com a sua urgência, por programação regressiva a partir das datas de entrega utilizando o *lead time* planeado de cada estágio produtivo*;*
- FIFO (*first-in-first-out*) – os trabalhos são ordenados pela ordem de chegada à *pool*;
- SPT (*shortest processing time*) – a ordenação é feita pelo menor tempo de processamento do trabalho no primeiro estágio do seu roteiro de fabrico.

O terceiro fator experimental, amplitude do cartão, é testado a três níveis de acordo com as seguintes amplitudes dos cartões:

- 0 - 100% do maior tempo de processamento dos trabalhos – o que significa que é atribuído apenas um cartão a cada trabalho, independentemente da carga do trabalho;
- 0-33%, significa que podem ser atribuídos a cada trabalho no máximo três cartões a cada trabalho, dependendo da carga do trabalho;
- 0-20%, significa que são atribuídos no máximo cinco cartões a cada trabalho.

Este fator refere-se à percentagem de carga em relação à carga máxima, ou tempo de processamento, que uma operação de transformação pode ter, que no caso em estudo é de quatro horas. Portanto quando a amplitude é 0 a 20% isto significa que no extremo são necessários cinco cartões para lançar e processar um trabalho num centro de trabalho, caso em que a operação demore quatro horas. Se demorar menos o trabalho terá o número proporcional de cartões necessário. No caso de amplitude 0 a 100% apenas um cartão é usado em todas as circunstâncias para representar toda a carga do trabalho em cada fase.

O quarto fator experimental, metodologia para definição do número de cartões por *loop,* é testado em dois níveis:

- A: Igual: o número de cartões definido é igual em todos os *loops*;
- B: Diferente: o número de cartões é determinado baseado na lei de *Little* para cada *loop*. Isto significa que os estágios produtivos a jusante no roteiro de fabrico de um trabalho precisam de um maior número de cartões disponíveis, pois nestes estágios produtivos o tempo de *percurso* dos cartões é maior, ficando portanto retidos mais tempo no sistema. Assim é atribuído um número de cartões C_{jv} a cada *loop*, em função do tempo em que permanece no sistema. Usa-se como ponto de partida o numero de cartões atribuído ao primeiro *loop* associado ao primeiro centro C_{j1} do roteiro de um trabalho, conforme a expressão seguinte:

$$C_{jv} = \frac{\sum_{w \in S_{jv}} T_w}{T_v} \cdot C_{j1} \tag{9}$$

onde T_v e T_w são os *lead times* nos estágios produtivos v e w respectivamente, e S_{jv} corresponde ao conjunto de estágios produtivos que inclui o estágio v e todos a montante dele no roteiro do trabalho j.

O quinto fator experimental, número de cartões por *loop*, é testado a oito níveis. Começando com um valor infinito de cartões por loop, o que significa que ao chegarem ao sistema produtivo os trabalhos são imediatamente lançados para o EF, i.e. não são retidos na PSP. O número de cartões por *loop* é gradualmente reduzido de forma a restringir a quantidade de trabalhos em processamento, i.e. diminuir a carga.

Apenas o primeiro e o quinto fator foram testados a todos os níveis dos restantes fatores. No restantes caso foram usados os nível de referência assinalados com sublinhado na Tabela 3, á que o desempenho para os outros níveis era similar.

5.3.2 Resultados

A Figura 9, Figura 10 e Figura 11 apresentam os resultados obtidos. Usando curvas de desempenho é possível analisar as diferenças de desempenho entre mecanismos para diferentes níveis de carga no sistema. Em cada curva, uma marca corresponde ao resultado de uma experiência de simulação com um número específico de cartões por *loop*. São testados oito valores diferentes.

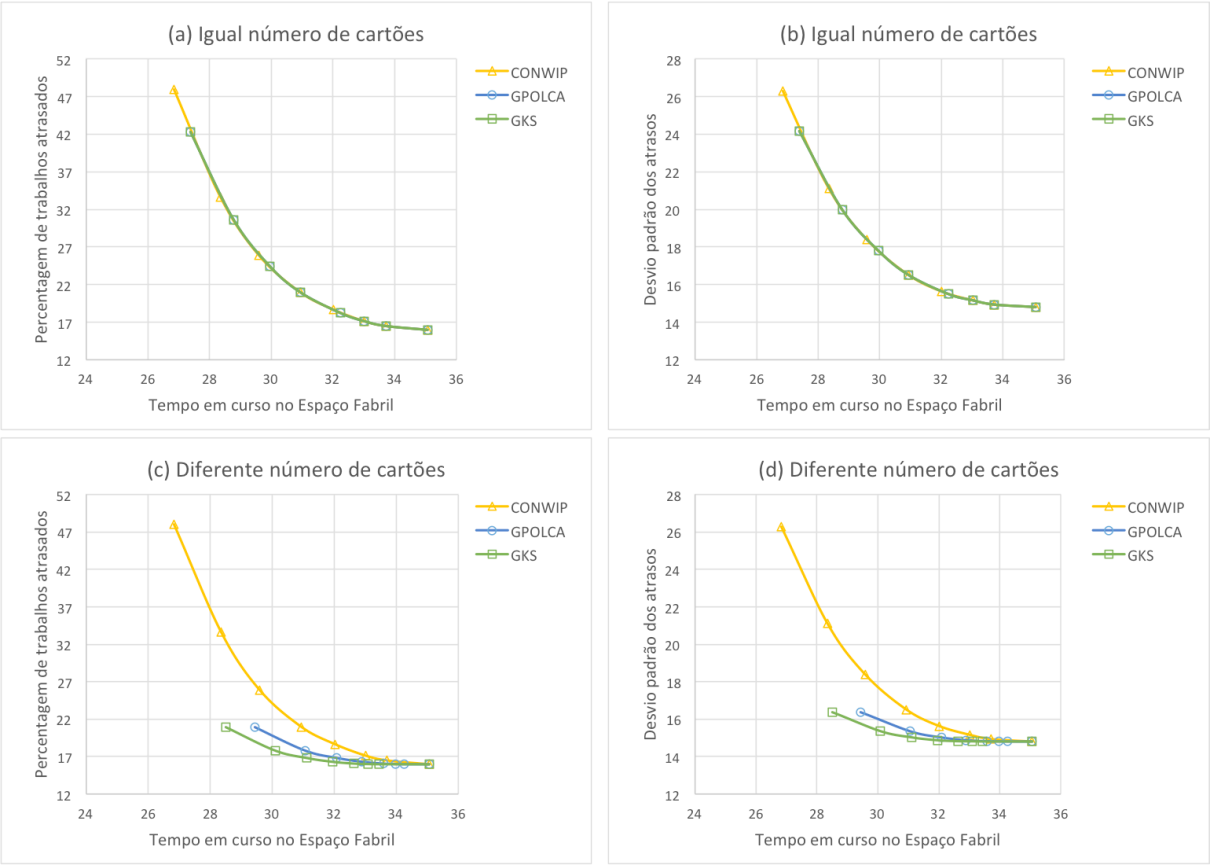

Figura 9 - Desempenho dos mecanismos de produção para igual número de cartões e diferente número de cartões por *loop*

Na Figura 9, são apresentados os resultados relativos à influência do fator metodologia de definição dos cartões, utilizando a regra PRT para sequenciação dos trabalhos na PSP, em que o amplitude do cartão corresponde a uma ente 0 e 100%. Como o CONWIP tem apenas um *loop,* as curvas que se encontram nos gráficos (a) e (c) são iguais para a percentagem de trabalhos atrasados, e nos gráficos (b) e (d) são iguais para o TEF. Como se pode ver nos gráficos (a) e (b), utilizando o mesmo número de cartões por estágio ou *loop*, o CONWIP, GKS e GPOLCA têm um desempenho similar. Contudo quando são definidos diferentes número de cartões para cada estágio, gráficos (c) e (d), pode observar-se que o desempenho do GPOLCA e do GKS melhora relativamente ao do CONWIP, sendo que o GKS desempenha ligeiramente melhor que o GPOLCA. A possível explicação está no facto do GPOLCA esperar sempre pelo processamento da segunda operação do par a que o cartão de controlo pertence

para o libertar, originando um lançamento mais "pastoso" do que o GKS que logo que uma operação é executada liberta o cartão correspondente para lançamento de outro trabalho, permitindo um lançamento mais "líquido" dos trabalhos, acelerando por isso, ligeiramente, a sua execução e, desta forma, melhorando o desempenho.

Os resultados indicam que o CONWIP, por não ter controlo local, i.e., apenas uma malha de controlo englobando todos os centros de trabalho, origina uma liberdade de controlo que prejudica o desempenho do sistema nas medidas de desempenho analisadas, quando comparado com os mecanismos GKS e GPOLCA, que tendo controlo local podem regular os trabalhos em curso por malha de controlo, i.e., variar os cartões por *loop* de acordo com a lei de *Little*.

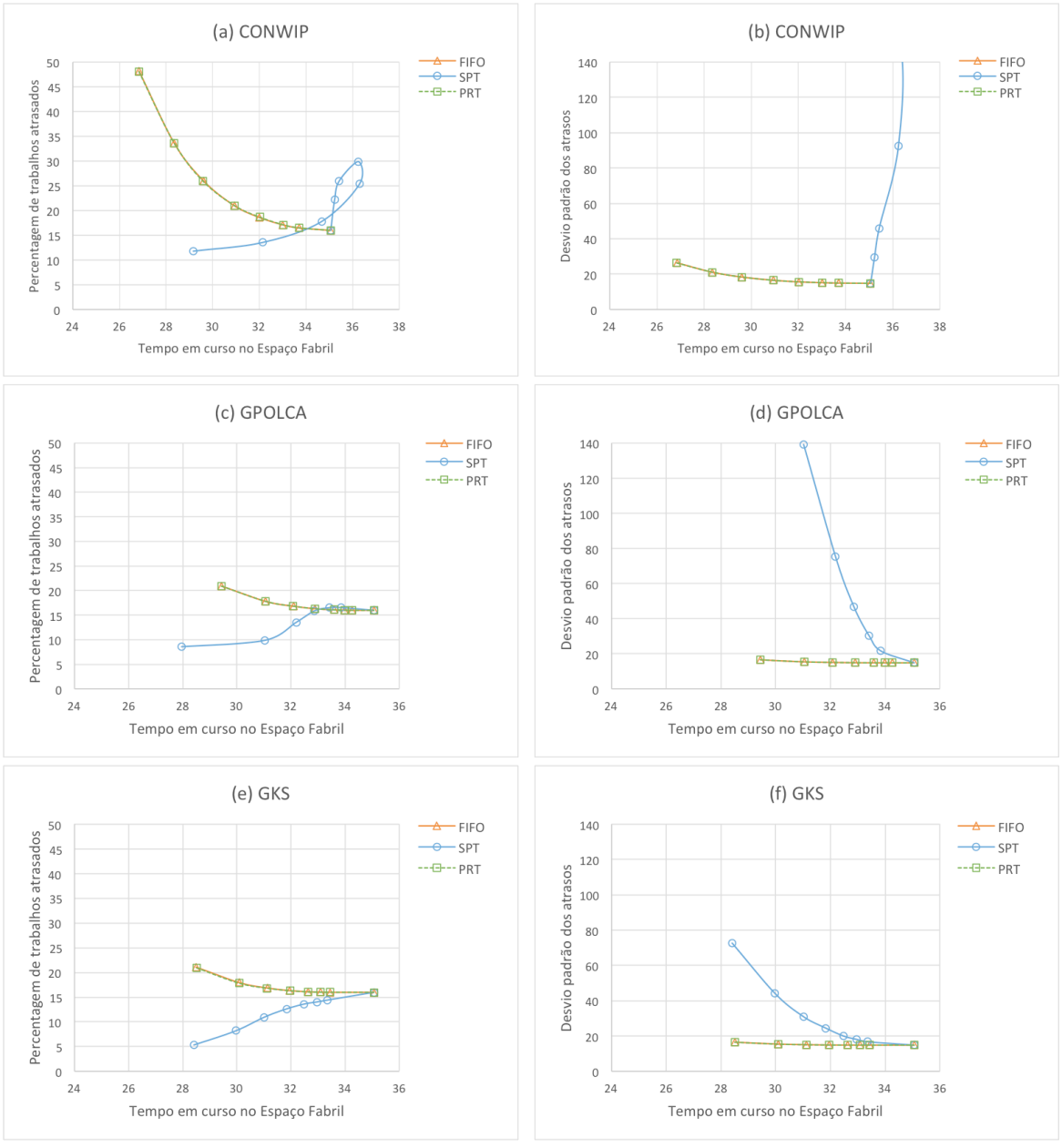

Figura 10 - Desempenho das regras de sequenciação no CONWIP, GPOLCA e GKS

A Figura 10 apresenta uma comparação entre as regras de sequenciação usadas na PSP para a situação em que o número de cartões por *loop* é diferente. Também aqui a amplitude do cartão corresponde a uma amplitude de carga entre 0 e 100%. Como se pode observar, as regras PRD e FIFO têm resultados similares em termos da percentagem de trabalhos em atraso e do desvio padrão do atraso nos três mecanismos analisados. A regra SPT resulta numa redução da percentagem de trabalhos em atraso, embora apresente desvio padrão do *lateness* desproporcionadamente elevado. A razão para tal acontecer deve-se ao facto de a regra SPT ordenar os trabalhos por tempo de processamento mais baixo na primeira operação, o que faz com que os trabalhos com tempos de processamento maiores passem mais tempo à espera de serem libertados na PSP, o que perturba o lançamento baseado na urgência dos trabalhos. Vê-se portanto que esta regra não é aconselhável usar.

O mecanismo CONWIP quando combinado com a regra SPT apresenta um comportamento algo errático, resultando em níveis extremamente elevados do desvio padrão do atraso. Novamente em produção por encomenda o CONWIP parece perder vantagem para os outros dois mecanismos que desempenham similarmente em relação às regras de sequenciamento na *pool*. Assim, a sua simplicidade de aplicação parece não compensar a perda de desempenho, e será, aparentemente desaconselhável usá-lo se o GKS ou GPOLCA puderem ser utilizados.

A Figura 11 mostra o impacto de diferentes amplitudes dos cartões para cada um dos mecanismos. O estudo é baseado na regra PRT e num número diferente de cartões para cada estágio de produção.

É possível verificar que esta alteração melhora o desempenho dos mecanismos, o que se pode justificar pelo facto de a carga do trabalho ser melhor representada, i.e., ser representada de forma mais precisa pelos cartões que lhe são atribuídos. Consegue-se assim um melhor controlo da carga no EF. Verifica-se também que o GKS é o mecanismo que obtém melhores resultados. Isto deve-se à forma como a carga é controlada no espaço fabril e como se usam os cartões. Assim não só tem influência o número de *loops* que no GKS é maior que nos outros mecanismos como também a forma como os cartões de controlo são libertados. Assim o GKS usa um *loop* de controlo por cada estágio produtivo e liberta os cartões à medida que as operações são executadas, o CONWIP usa apenas um *loop* em todo o sistema e só liberta cartões quando todas as fases de produção estão concluídas. Por sua vez, o GPOLCA tem menos um loop que o GKS, na fase inicial (ver secção 4.3.8), e só liberta cartões depois da segunda operação do par a que os cartões pertencem é processada.

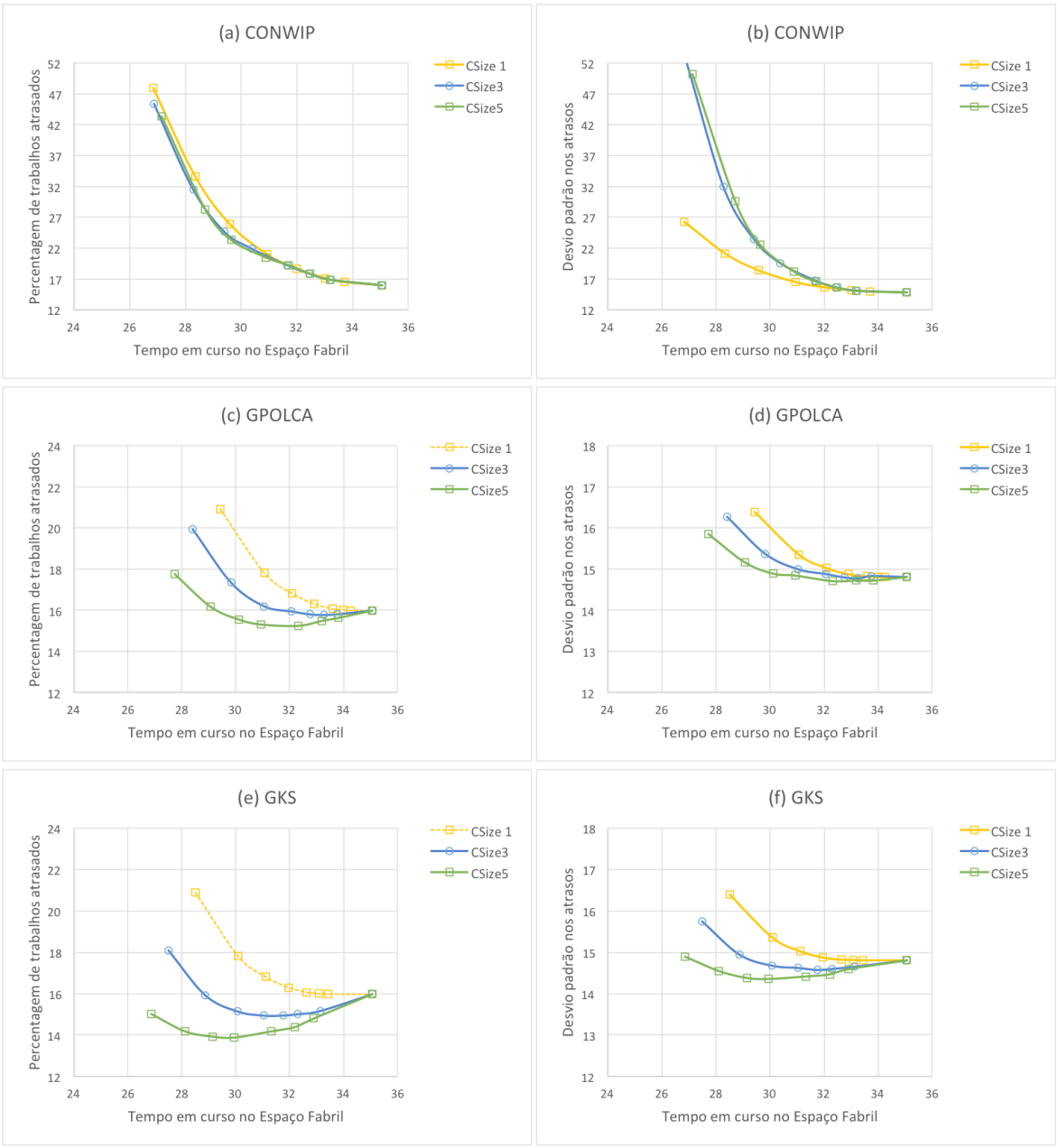

Figura 11 - Desempenho dos mecanismos de produção para diferentes amplitudes de cartão

5.4 Desempenho dos mecanismos baseados em carga

De seguida é analisado o desempenho dos mecanismos baseados no controlo de carga. São consideradas duas abordagens diferentes ao controlo da carga: *Workload Bounding* e *Workload Balancing*. Esta experimentação tem como objetivo analisar o desempenho destes mecanismos quando aplicados a um ambiente de produção com um fluxo unidirecional.

5.4.1 Plano de experimentação

Na Tabela 4 são apresentados os fatores de experimentação e os níveis a que foram testados.

Tabela 4 - Fatores de experimentação e níveis para a experimentação baseada em carga

Fator de experimentação	Níveis		
Mecanismo de CAP	Workload Bounding	Workload Balancing	
Regra de Sequenciação na PSP	PRT	SPT	TWK
Configuração do Sistema	PFS	GFS	
Normas de carga	Testado a 8 níveis		

O primeiro fator experimental, mecanismo de CAP, é testado a dois níveis:

- *Workload Bounding* – onde o trabalho é apenas libertado para o EF se a carga de todos os estágios produtivos no roteiro de fabrico desse trabalho não ultrapassar uma norma de carga ou limite superior;

- *Workload Balancing* – onde o trabalho é lançado para o EF se contribuir para um melhor balanceamento da carga entre os estágios produtivos, desde que esta não ultrapasse a norma de carga em mais que 50% (valor definido para este estudo). O índice de balanceamento (BI) é calculado com base na fórmula 1 da secção 3.3.2.

O segundo fator experimental, regra de sequenciação na PSP, é testado a três níveis:

- PRT (*planned release time*);

- SPT (*shortest processing time*);

- TWK (*largest total work content*) – dá prioridade aos trabalhos de acordo com o maior valor total de carga de cada trabalho, o qual é obtido somando os tempos de processamento do trabalho em cada estágio produtivo.

O terceiro fator experimental, configuração do sistema, foi testado a dois níveis debatidos na secção 4.3.4:

- *Pure Flow Shop* (PFS) - os trabalhos passam por todos os estágios produtivos de forma unidirecional;

- *General Flow Shop* (GFS) - os trabalhos têm um fluxo unidirecional, mas não existe a restrição de passar por todos os estágios produtivos.

O quarto fator experimental, as normas de carga, estabelecem o limite de carga em cada estágio de produção. Este foi testado para oito níveis, começando do infinito, onde os trabalhos são lançados para o EF imediatamente, reduzindo gradualmente a norma de carga de forma a restringir a carga que é lançada em produção.

Em qualquer das situações experimentais a carga é contabilizada de acordo com o método sugerido por Oosterman et al. (2000) conhecido como carga ajustada ou carga corrigida, detalhado na secção 3.3.1.

5.4.2 Resultados

Esta secção apresenta e discute os resultados obtidos. A Figura 12 e Figura 13 mostram os resultados obtidos pelos mecanismos, *Workload Balancing* e *Workload Bounding*, usando diferentes regras de sequenciação para as configurações PFS e GFS, respetivamente.

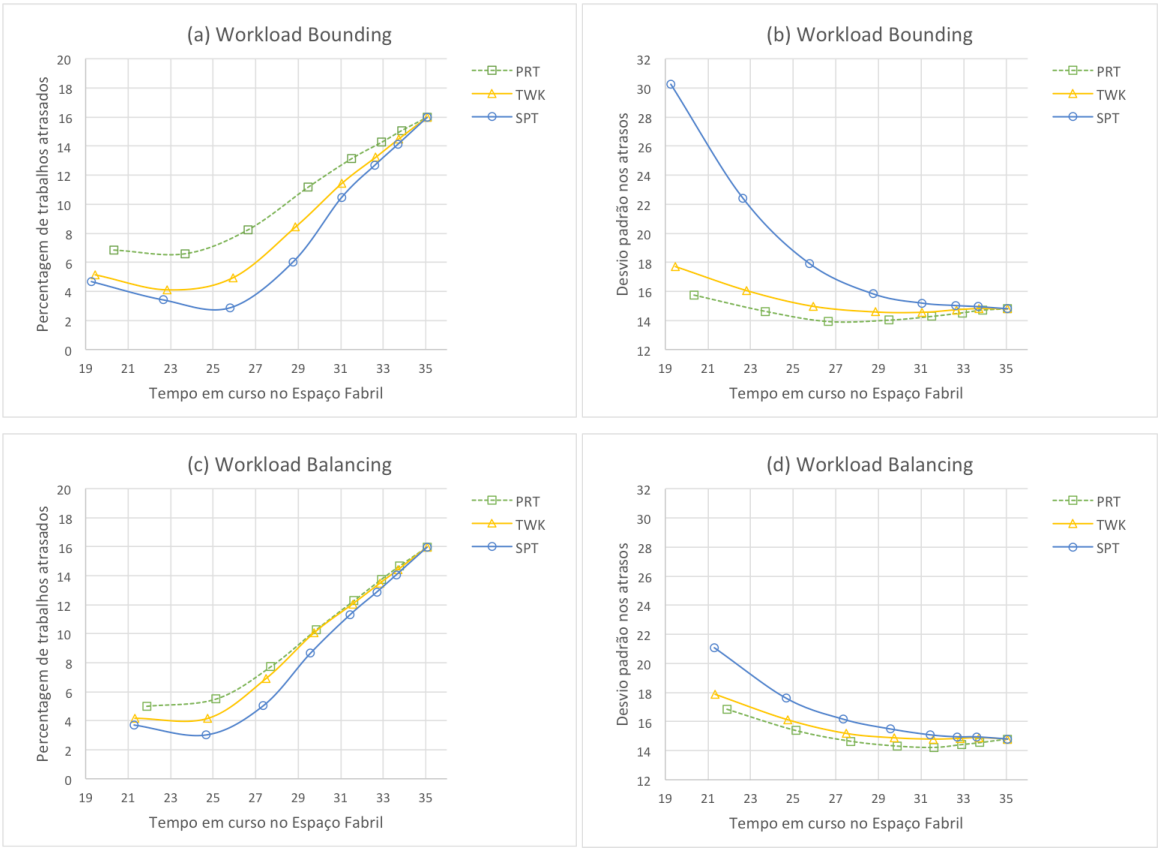

Figura 12 - Desempenho do Workload Bounding e Workload Balancing em ambiente PFS

Os resultados para a PFS revelam que a regra de sequenciação SPT obtém melhores resultados em termos de percentagem de trabalhos atrasados, tanto para o método *Workload Bounding* como *Workload Balancing*. Porém, nesta regra, restringindo a carga que pode ser lançada no sistema faz com que o desvio padrão dos atrasos aumente significativamente. Tal fica a dever-se ao facto da regra SPT perturbar o lançamento baseado na urgência dos trabalhos como aliás já se tinha verificado no caso de mecanismos baseado em cartões na seção anterior. Quanto às restantes duas regras, estas obtêm um desempenho melhor que SPT para o desvio padrão dos atrasos, em particular PRT, como seria de esperar, pois esta regra ordena os trabalhos para lançamento de acordo com a urgência. A regra TWK tem um melhor desempenho na percentagem de trabalhos atrasados relativamente à regra PRT, contudo apresenta resultados ligeiramente mais altos para o desvio padrão do atraso, aparentemente por não estar alinhada pela urgência dos trabalhos como o está a PRT.

Pode ainda verificar-se que o método *Workload Balancing* é mais robusto ao impacto da regra de sequenciação na *pool*, uma vez que as curvas se encontram mais próximas umas das outras neste método, especialmente no caso da linha pura, i.e. PFS.

Os resultados para PFS mostram ainda que o desempenho do método de controlo de carga depende da regra de sequenciação na PSP, ou seja: o *Workload Balancing* obtém melhores resultados que o *Workload Bounding* quando PRT é usado. No entanto, quando são usadas as outras regras de sequenciação a percentagem de trabalhos atrasados tem um comportamento idêntico ou ligeiramente pior para o *Workload Balancing* comparativamente com o *Workload Bounding*.

A Figura 13 apresenta os resultados para a GFS. Neste caso não existem diferenças significativas no desempenho dos mecanismos e no desempenho das regras de sequenciação. A regra de sequenciação aparenta também não ter impacto no desempenho do método.

A ilação que daqui se pode tirar com vista a aplicação prática dos mecanismos estudados é que no caso de haver uma mistura de roteiros, mesmo em ambiente de *flow shop*, como é o caso da GFS, não só as três regras estudadas têm desempenho similar como o têm os dois mecanismos. Infere-se daqui que esta configuração de sistema de produção robusta à alteração de mecanismos ou regras de controlo da atividade produtiva estudadas, podendo portanto qualquer combinação ser usada com resultados similares.

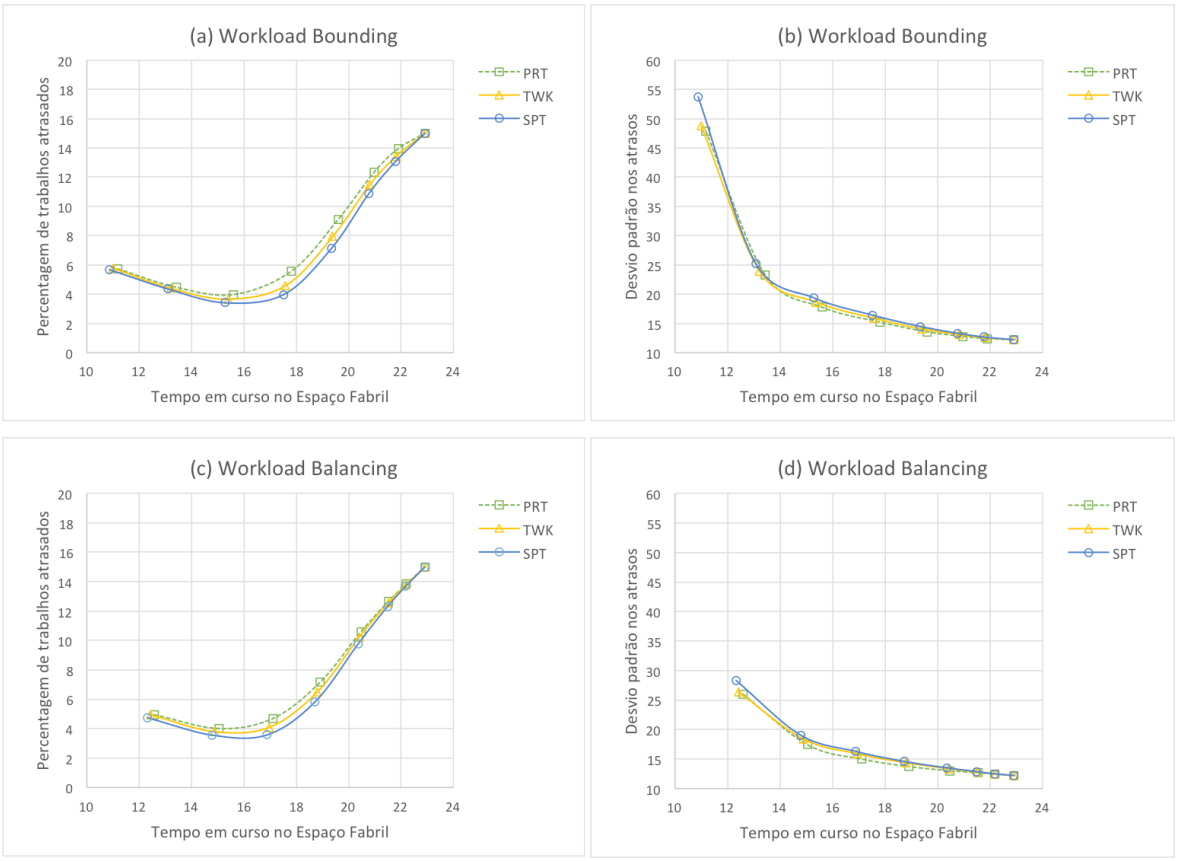

Figura 13 - Desempenho do Workload Bounding e Workload Balancing em ambiente GFS

5.5 Comparação entre os mecanismos baseados em cartões e baseados em carga

Após uma análise em separado ao desempenho de mecanismos baseados em cartões e de mecanismos baseados em carga, este capítulo procura fazer uma análise cruzada tentando perceber se há diferenças significativas no desempenho destes mecanismos num ambiente de produção MTO e fluxo unidirecional. Neste caso o estudo restringiu-se à configuração PFS.

Como se verificou na experimentação baseada em cartões, o GKS obteve o melhor desempenho quando comparado ao GPOLCA e CONWIP, por essa razão o GKS será o mecanismo utilizado para fazer esta comparação.

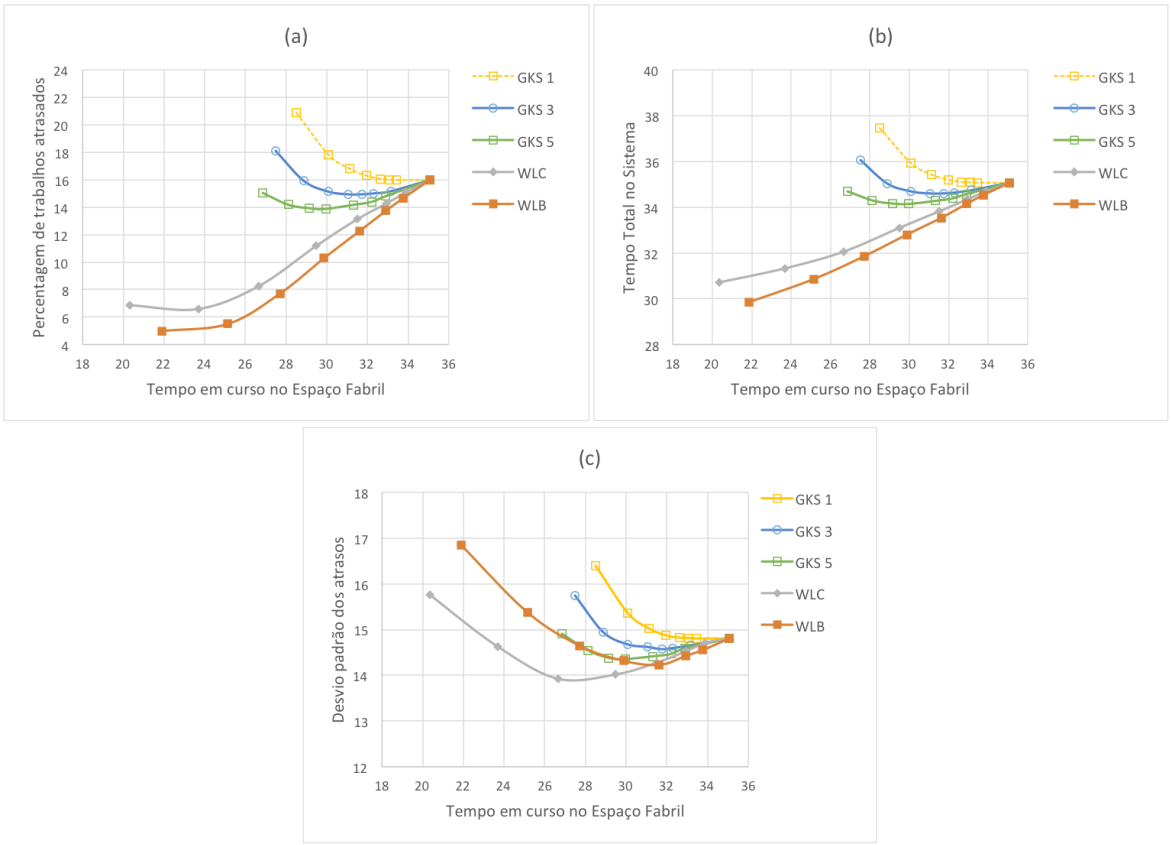

Figura 14 - Desempenho dos mecanismos em ambiente MTO com fluxo unidirecional

A Figura 14 apresenta os resultados para a percentagem de trabalhos atrasados, tempo de total no sistema e para o desvio padrão do atraso. GKS1 corresponde a uma amplitude de carga 0-100%, GKS3 0-33% e GKS5 de 0-20%. WLC refere-se ao *Workload Bounding* e WLB ao *Workload Balancing*.

Comparando o desempenho dos mecanismos é possível verificar, como seria de esperar, que os mecanismos baseados em carga, *Workload Bounding* e *Workload Balancing*, apresentam melhor desempenho que os mecanismos baseados em cartões, GKS. Contudo, tal como observado anteriormente, é possível melhorar o desempenho do GKS, quer em termos da percentagem de trabalhos em atraso quer em termos do desvio padrão do atraso e do tempo de percurso no espaço fabril, se se usar menores amplitudes de cartão, i.e. se a carga do trabalho for representada de forma mais precisa pelos cartões que lhe são atribuídos.

No entanto é de realçar a simplicidade de controlo associada aos mecanismos de controlo baseados em cartões, já anteriormente referida, que pode na prática justificar o seu uso em produção por encomenda apesar do seu desempenho ser potencialmente inferior ao de mecanismos baseados na carga. Dos testados o GKS seria, naturalmente preferencialmente escolhido.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1 Introdução

No mercado competitivo atual as empresas procuram ser flexíveis para se adaptarem o mais rapidamente possível a alterações que sejam necessárias. Por vezes estas alterações podem levar a alterações que exigem uma mudança na forma de efetuar o Controlo da Atividade Produtiva (CAP). Os mecanismos de CAP baseados em cartões são reconhecidos pela sua simplicidade de aplicação e facilidade na obtenção de informação sobre o atual estado do espaço fabril, o que torna mais eficaz o controlo sistema de produção. Apesar de a grande maioria deste tipo de mecanismos serem mais adequados à produção para *stock*, alguns apresentam potencial para aplicação à produção por encomenda, com a possibilidade de obter um desempenho atrativo.

O trabalho apresentado nesta dissertação permite tirar conclusões sobre o desempenho de mecanismos baseados em cartões num ambiente de produção para encomenda (MTO)

Este estudo contribui para uma reflexão sobre as possibilidades de aplicação destes mecanismos em ambiente MTO.

A revisão da literatura existente permitiu identificar alguns mecanismos baseados em cartões considerados mais relevantes. Para este estudo foram selecionados o *Constant Work in Process* (CONWIP), *Generic* POLCA (GPOLCA) e *Generic Kanban System* (GKS).

Neste seguimento, a secção 6.2 apresenta as conclusões sobre este estudo e a secção 6.3 sugere algumas sugestões para trabalho futuro.

6.2 Conclusões

Numa comparação da caracterização entre os mecanismos em estudo, i.e. CONWIP, GPOLCA e GKS, com outros dois mecanismos baseados em cartões de relevância, nomeadamente TKS e POLCA, foi possível verificar que o que apresenta maiores diferenças com os restantes é o TKS. Entre estes mecanismos o TKS é o único que não é aplicável em ambiente MTO. O equivalente em ambiente MTO é o GKS. O CONWIP revela-se como o mecanismo com maior simplicidade e flexibilidade de aplicação, aparentemente sem restrições embora mais recomendável para configurações do tipo linha de fabrico.

Em particular o seu controlo global de carga torna-o um pouco "grosseiro" no controlo da produção. GKS, POLCA e GPOLCA revelaram-se como sendo os mais aplicáveis à produção MTO.

Os mecanismos baseados em cartões restringem a carga no sistema ou nos estágios de produção limitando a quantidade de trabalhos nestes. Contudo num ambiente MTO, existe uma grande variação na carga que cada trabalho representa. Na tentativa de adequar os mecanismos objeto de estudo à produção MTO, foi sugerido um refinamento que consiste em que cada cartão não represente a carga total de um trabalho mas apenas parte deste, podendo atribuir mais do que um cartão a um trabalho consoante a carga deste. Adicionalmente a afetação de um número diferente de cartões de acordo com a distância do CT em relação ao primeiro do roteiro dos trabalhos, numa lógica de aplicação da lei de *Little*, revelou-se determinante na melhoria do desempenho dos mecanismos em MTO.

Três fases diferentes de experimentação foram definidas para avaliar estes mecanismos. A primeira estuda o desempenho dos mecanismos de CAP baseados em cartões num ambiente MTO, avaliando o desempenho do CONWIP, GPOLCA e GKS. Foi estudado o desempenho destes mecanismos variando a regra de sequenciação, nomeadamente PRT, FIFO e SPT, utilizada para ordenar os trabalhos na PSP. Observou-se que estes mecanismos desempenham melhor quando diferentes números de cartões são atribuídos a cada *loop* calculados através da equação 9.

Da primeira fase de experimentação concluiu-se que o GPOLCA e GKS se apresentam como soluções para obter um melhor desempenho em ambiente MTO se o número de cartões atribuído a cada trabalho refletir melhor a carga total do trabalho. O melhor desempenho destes dois sistemas com este refinamento pode ser justificado pelo facto destes balancearem melhor a carga entre os estágios de produção contrariamente ao CONWIP. Também as regras de sequenciação demonstraram ter influência no desempenho dos mecanismos. Enquanto que os mecanismos que utilizarem as regras de sequenciação PRT e FIFO revelaram um desempenho similar, o uso da regra SPT apresentou no geral um aumento significativo nos valores do desvio padrão dos atrasos, pelo que o seu uso não é recomendado.

A segunda fase de experimentação pretende estudar o desempenho de mecanismos de lançamento baseados em carga, nomeadamente *Workload Bounding* e *Workload Balancing*, e de três diferentes regras de sequenciação (PRT, SPT e TWK) na PSP, num ambiente MTO com duas diferentes configurações do EF (PFS e GFS). Numa configuração PFS, onde os mecanismos são mais sensíveis, os resultados demonstram que o *Workload Balancing* revela-se como o mecanismo de CAP mais eficaz entre os dois. O *Workload Balancing* demonstra ser mais robusto do que o *Workload Bounding* em

relação ao impacto da regra de sequenciação usada. No caso de ser usada a regra PRT o *Workload Bounding* é claramente inferior. A regra PRT é normalmente utilizada no âmbito de estudos sobre o WLC para selecionar trabalhos da PSP e como tal este resultado obtido é relevante. Em situações de uso prático, é de esperar menos variação entre as regras de sequenciação escolhidas, o que deve reduzir os efeitos negativos da regra escolhida.

Quando a configuração do EF é do tipo GFS não são identificadas diferenças no desempenho tanto dos mecanismos como das regras de seleção. Estudos anteriores sugerem uma possível incongruência no que diz respeito ao desempenho do *Workload Bounding*, contudo agora é possível concluir que o desempenho de estratégias de controlo de carga dependem da configuração do EF e da regra de sequenciação utilizada na PSP.

A terceira fase de experimentação compara o desempenho de mecanismos baseados em cartões com mecanismos baseados em carga. Para esta experimentação o GKS foi comparado com o *Workload Bounding* e *Workload Balancing*. O objetivo é verificar se os refinamentos propostos para os mecanismos baseados em cartões, trazem ganhos relativamente aos mecanismos baseados em carga. Deste estudo é possível verificar que para o GKS quanto menor for o amplitude do cartão, i.e. quanto menor for o quantidade de carga que o cartão representa, melhor é o seu desempenho. Contudo apesar desta melhoria, o mecanismo baseado em cartões não desempenha melhor que os mecanismos baseados em carga estudados. Entre os dois mecanismos baseados em carga estudados o que desempenha melhor é o *Workload Balancing*, obtendo melhores resultados para a percentagem de trabalhos atrasados e Tempo Total no Sistema. Apesar disso é o *Workload Bounding* que obtém melhores resultados relativamente ao desvio padrão do atraso.

Deste estudo se observa que baseando a escolha apenas no desempenho aquele que é mais recomendado para uso é o *Workload Balancing* em ambiente MTO com fluxo unidirecional. Contudo, em termos de aplicação prática, o uso de mecanismos baseados em cartões revela-se como uma solução nestes ambientes se os cartões representarem carga em vez de um trabalho. A simplicidade de aplicação de mecanismos baseados em cartões, juntamente com o seu apelativo controlo sem necessidade de aquisição de dados como a contabilização da carga no sistema ou em cada estágio de produção, pode muito bem justificar a sua utilização em pequenas e médias empresas, visto que como se verificou, o GKS obtém um desempenho aceitável neste ambiente.

6.3 Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, sugere-se que se possa alargar este estudo a outros mecanismos baseados em cartões, bem como a outras configurações do EF como é o caso das *General Job Shop*. Poderá também sugerir-se que este estudo seja feito com um ambiente de produção diferente, utilizando por exemplo um sistema com *bottlenecks* e levando em conta os tempos de *setup*. Poderá ser também estudada a hipótese de no refinamento sugerido se estudar o desempenho para uma amplitude de carga menor.

BIBLIOGRAFIA

Aziz, M. H., Bohez, E., Kanda, Y., Hibino, H., & Sakuma, T. (2013). Bottleneck Oriented Card-Based Production Control for Push Repetitive Manufacturing Systems. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 7(3), 377-397.

Bechte, W. (1980). *Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung*. Dissertação, University of Hannover: Hannover, Germany.

Bechte, W. (1982). Controlling manufacturing lead time and work-in-process inventory by means of load-oriented order release. Proceedings from: *American Production and Control Inventory Society*, 67-71.

Bechte, W. (1988). Theory and practice of load-oriented manufacturing control. *The International Journal of Production Research*, 26(3), 375-395.

Bechte, W. (1994). Load-oriented manufacturing control just-in-time production for job shops. *Production Planning and Control*, 5(3), 292-307.

Benton, W. C., & Shin, H. (1998). Manufacturing planning and control: The evolution of MRP and JIT integration. *European Journal of Operational Research*, 110(3), 411-440.

Bergamaschi, D., Cigolini, R., Perona, M., & Portioli, A. (1997). Order Review and release strategies in a job shop environment: A review and a classification. *International Journal of Production Research*, 35(2), 399-420.

Bertrand, J. W. M., & Wortmann, J. C. (1981). Production control and information systems for component-manufacturing shops. *Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.*

Blackstone, J. H., Phillips, D. T., & Hogg, G. L. (1982). A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*, 20(1), 27-45.

Bonvik, A. M., Couch, C. E., & Gershwin, S. B. (1997). A comparison of production-line control mechanisms. *International Journal of Production Research*, 35(3), 789-804.

Bozarth, C., & Chapman, S. (1996). A contingency view of time-based competition for manufacturers. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(6), 56-67.

Breithaupt, J. W., Land, M., & Nyhuis, P. (2002). The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release. *Production Planning & Control*, 13(7), 625-638.

Burbidge, J. L. (1990). Production control: a universal conceptual framework. *Production Planning & Control*, 1(1), 3-16.

Buzacott, J. A. (1989). Queueing models of kanban and MRP controlled production systems. *Engineering Costs and Production Economics*, 17(1), 3-20.

Carmo-Silva, S. (2010). *Textos de Gestão da Produção, v01_10*. Publicação Interna Departamento de Produção e Sistemas, Universidade do Minho, Braga.

Carmo-Silva, S. (2013). "Aulas e Slides da Unidade Curricular de Sistemas de Controlo da Atividade Produtiva". *Publicação Interna, Departamento de Produção e Sistemas, Mestrado em Engenharia de Sistemas, ano letivo 2012-2013, Universidade do Minho, Braga.*

Chang, T. M., & Yih, Y. (1994). Generic kanban systems for dynamic environments. *The International Journal of Production Research*, 32(4), 889-902.

Cheng, T. C. E. (1987). A simulation study of MRP capacity planning with uncertain operation times. *International Journal of Production Research*, 25(2), 245-258.

Cox III, J. F., & Spencer, M. S. (2002). *Manual da Teoria das Restrições: Prefácio de Eliyahu M. Goldratt*. Bookman.

Depuy, G. W., Usher, J. S., Walker, R. L., & Taylor, G. D. (2007). Production planning for remanufactured products. *Production Planning & Control*, 18(7), 573-583.

Fernandes, N. O., & Carmo-Silva, S. (2005). A generic workload control model for order release and workflow control. *Proceedings of the 18th International Conference on Production Research*, Fisciano, Itália.

Fernandes, N. O., & Carmo-Silva, S. (2006). Generic POLCA—A production and materials flow control mechanism for quick response manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 104(1), 74-84.

Fernandes, N. O., & Carmo-Silva, S. (2011a). Workload Control under continuous order release. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 257-262.

Fernandes, N.O., & Carmo-Silva, S. (2011b). Order release in a workload controlled flow-shop with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, 49(8), 2443-2454.

Fowler, J. W., Hogg, G. L., & Mason, S. J. (2002). Workload control in the semiconductor industry. *Production Planning and Control*, 13(7), 568-578.

Framinan, J. M., González, P. L., & Ruiz-Usano, R. (2003). The CONWIP production control system: review and research issues. *Production Planning & Control*, 14(3), 255-265.

Fredendall, L. D., Ojha, D., & Patterson, J. W. (2010). Concerning the theory of workload control. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 99-111.

Fullerton, R. R., & McWatters, C. S. (2001). The production performance benefits from JIT implementation. *Journal of Operations Management*, 19(1), 81-96.

Germs, R., & Riezebos, J. (2010). Workload balancing capability of pull systems in MTO production. *International Journal of Production Research*, 48(8), 2345-2360

Glassey, C. R., & Resende, M. G. (1988). Closed-loop job release control for VLSI circuit manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1, 36-46.

Goldberg, H. M. (1977). Analysis of the Earliest Due Date Scheduling Rule in Queueing Systems. *Mathematics of Operations Research*, 2(2), 145-154.

González-R, P. L., Framinan, J. M., & Pierreval, H. (2012). Token-based pull production control systems: an introductory overview. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 5-22.

Gülsün, B., Özgürler, S., Kurtcan, E., & Güresen, E. (2009). Improving system performance: the theory of constraints and an application in a production firm. *Society of Manufacturing Engineers*, (Technical Paper).

Gunasekaran, A., & Ngai, E. W. (2005). Build-to-order supply chain management: a literature review and framework for development. *Journal of operations management*, 23(5), 423-451

Gupta, Y. P., & Gupta, M. C. (1989). A system dynamics model for a multi-stage multi-line dual-card JIT-kanban system. *The International Journal of Production Research*, 27(2), 309-352.

Harrod, S., & Kanet, J. J. (2013). Applying work flow control in make-to-order job shops. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 620-626.

Hart, M. A. (2005). The Second Century: Reconnecting Customer and Value Chain through Build-to-Order: Moving beyond Mass and Lean Production in the Auto Industry. *Journal of Product Innovation Management*, 22(2), 215-216.

Hendry, L. C. (1989). *A decision support system to manage delivery and manufacturing lead times in make to order companies*. Tese de Doutoramento, Lancaster University: Lancaster, UK.

Hendry, L. C., & Kingsman, B. G. (1989). Production planning systems and their applicability to make-to-order companies. *European Journal of Operational Research*, 40, 1-15.

Hendry, L. C., & Kingsman, B. G. (1991). A decision support system for job release in make to order companies. *International Journal of Operations and Production Management*, 11, 6-16.

Hendry, L. C., & Wong, S. K. (1994). Alternative order release mechanisms: a comparison by simulation. *International Journal of Production Research*, 32(12), 2827-2842.

Hum, S. H., & Sim, H. H. (1996). Time-based competition: literature review and implications for modelling. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(1), 75-90.

Irastorza, J. C., & Deane, R. H. (1974). A loading and balancing methodology for job shop control. *AIIE Transactions*, 6(4), 302-307.

Junior, M. L., & Filho, M. G. (2010). Variations of the Kanban system: Literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, 125(1), 13-21.

Kallmes, M. H., Towsley, D., & Cassandras, C. G. (1989). Optimality of the last-in-first-out (LIFO) service discipline in queuing systems with real-time constraints. *Proceedings of the 28th IEEE Conference* on *Decision and Control,* 1073-1074.

Kim, S. C., & Bobrowski, P. M. (1994). Impact of sequence-dependent setup time on job shop scheduling performance. *The International Journal of Production Research*, 32(7), 1503-1520.

Kingsman, B., & Hendry, L. (2002). The relative contributions of input and output controls on the performance of a workload control system in make-to-order companies. *Production planning & control*, 13(7), 579-590.

Köber, J., & Heinecke, G. (2012). Hybrid production strategy between make-to-order and make-to-stock – A case study at a manufacturer of agricultural machinery with volatile and seasonal demand. *Procedia CIRP*, 3, 453-458

Krishnamurthy, A., & Suri, R. (2009). Planning and implementing POLCA: a card-based control system for high variety or custom engineered products. *Production planning and control*, 20(7), 596-610.

Land, M. J., & Gaalman, G. J. C. (1996). Workload control concepts in job shops: A critical assessment. *International Journal of Production Economics*, 46-47, 535-538.

Land, M. J., & Gaalman, G. J. (1998). The performance of workload control concepts in job shops: improving the release method. *International Journal of Production Economics*, 56, 347-364.

Land, M. J. (2006). Parameters and sensitivity in Workload Control. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 625-638.

Land, M. J. (2009). Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control. *International Journal of Production Economics*, 117(1), 97-103.

Monden, Y. (1983). *Toyota production system: practical approach to production management*. Norcross, GA: Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers.

Nori, V. S., & Sarker, B. R. (1998). Optimum number of kanbans between two adjacent stations. *Production Planning & Control*, 9(1), 60-65.

Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: beyond large-scale production*. Productivity Press.

Onur, L., & Fabrycky, W. J. (1987). An input/output control system for the dynamic job shop. *IIE transactions*, 19(1), 88-97.

Oosterman, B., Land, M., & Gaalman, G. (2000). The influence of shop characteristics on workload control. *International Journal of Production Economics*, 68(1), 107-119.

Plossl, G. W., & Orlicky, J. (1994). *Orlicky's material requirements planning*. McGraw-Hill Professional.

Paternina-Arboleda, C. D., & Das, T. K. (2001). Intelligent dynamic control policies for serial production lines. *IIE Transactions*, 33(1), 65-77.

Prakash, J., & Chin, J. F. (2014). Modified CONWIP systems: a review and classification. *Production Planning & Control*, (ahead-of-print), 1-12.

Rajendran, C., & Holthaus, O. (1999). A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 156-170.

Rochette, R., & Sadowski, R. P. (1976). A statistical comparison of the performance of simple dispatching rules for a particular set of job shops. *International Journal of Production Research*, 14(1), 63-75.

Sabuncuoglu, I., & Karapinar, H.Y. (2000). Analysis of order review/release problems in production systems. *International Journal of Production Economics*, 62(3), 259-279.

Sabuncuoglu, I., & Karapinar, H.Y. (2000). A load-based and due-date-oriented approach to order review/release in job shops. *Decision Sciences*, 31(2), 413-447.

Shimoyashiro, S., Isoda, K., & Awane, H. (1984). Input scheduling and load balance control for a job shop. *International Journal of Production Research*, 22, 597–605.

Sim, K. L., & Curatola, A. P. (1999). Time-based competition. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 16(7), 659-674.

So, K. C., & Pinault, S. C. (1988). Allocating buffer storages in a pull system. *The International Journal Of Production Research*, 26(12), 1959-1980.

Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. J. (1990). CONWIP: a pull alternative to kanban. *The International Journal of Production Research*, 28(5), 879-894.

Stalk, G. (1988). Time - The next source of competitive advantage. *Harvard Business Review*, 66(4), 41-51.

Stevenson*, M., Hendry, L. C., & Kingsman†, B. G. (2005). A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, 43(5), 869-898.

Stevenson, M., & Hendry, L. C. (2006). Aggregate load-oriented workload control: a review and re-classification of a key approach. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 676-693.

Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (1977). Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553-564.

Sultana, I., & Ahmed, I. (2014). A state of art review on optimization techniques in just in time. *Uncertain Supply Chain Management*, 2(1), 15-26.

Suri, R. (1998). *Quick Response Manufacturing: a companywide approach to reducing lead times*. Productivity Press.

Suri (2003). QRM and POLCA: A winning combination for manufacturing enterprises in the 21st century. *Technical Report, Center for Quick Response Manufacturing*.

Tardif, V., & Maaseidvaag, L. (2001). An adaptive approach to controlling kanban systems. *European Journal of Operational Research*, 132(2), 411-424.

Tatsiopoulos, I.P. (1983). *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*. Tese de Doutoramento, Lancaster University: Lancaster, UK.

Tayur, S. R. (1993). Structural properties and a heuristic for kanban-controlled serial lines. *Management Science*, 39(11), 1347-1368.

Thürer, M., Stevenson, M., & Silva, C. (2011). Three decades of workload control research: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 49(23), 6905-6935.

Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M. J., & Fredendall, L. D. (2012). Workload Control and Order Release: A Lean Solution for Make-to-Order Companies. *Production and Operations Management*, 21(5), 939-953.

Thürer, M., Qu, T., Stevenson, M., Maschek, T., & Filho, M. G. (2014). Continuous workload control order release revisited: an assessment by simulation. *International Journal of Production Research*, (ahead-of-print), 1-17.

Thürer, M., Land, M. J., & Stevenson, M. (2014). Card-based workload control for job shops: Improving COBACABANA. *International Journal of Production Economics*, 147, 180-188.

Vandaele, N., Claerhout, D., Nieuwenhuyse, I. v., & Cremmery, R. (2005). E-POLCA to control multi-product, multimachine job shops. *University of Antwerp Research Paper,* 7.

Vandaele, N., Nieuwenhuyse, I. v., Claerhout, D., & Cremmery, R. (2008). Load-based POLCA: an integrated material control system for multiproduct, multimachine job-shops. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(2), 181-197.

Wein, L. M. (1988). Scheduling semiconductor wafer fabrication. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 1(3), 115-130.

Wiendahl, H. P. (1995). *Load oriented manufacturing control*. Berlin: Springer.

Wight, O. (1970). Input/output control: a real handle on lead time. *Production and Inventory Management*, 11(3), 9-31.

Wisner, J. D. (1995). A review of the order release policy research. *International Journal of Operations and Production Management*, 15(6), 25-40.

Yasin, M. M., Small, M., & Wafa, M. A. (1997). An empirical investigation of JIT effectiveness: an organizational perspective. *Omega*, 25(4), 461-471.

Zäpfel, G., & Missbauer, H. (1993). New concepts for production planning and control. *European Journal of Operational Research*, 67, 297-320.

ANEXO A – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A1 – CONWIP

Tabela 5 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade PRT

Ptardy	47,9963	33,6527	25,9126	20,9771	18,671	17,1236	16,4904	15,9727
Std lateness	26,2918	21,1036	18,3754	16,5079	15,6313	15,1637	14,9382	14,8039
lateness	7,4219	-4,3875	-9,44	-12,37	-13,67	-14,38	-14,7	-14,94
TTS	57,4269	45,6176	40,566	37,6377	36,334	35,6284	35,3078	35,0628
TEF	26,8401	28,3471	29,5885	30,937	32,0134	33,0155	33,7076	35,0628
Cartões	26	29	32	36	40	45	50	inf

Tabela 6 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade FIFO

Ptardy	48,1846	33,6378	26,0047	20,9745	18,5875	17,1004	16,4787	15,9727
Std lateness	26,3811	21,0853	18,359	16,5422	15,6246	15,1459	14,9386	14,8039
lateness	7,4061	-4,4058	-9,41	-12,36	-13,69	-14,39	-14,7	-14,94
TTS	57,411	45,5992	40,5945	37,6472	36,3144	35,6108	35,308	35,0628
TEF	26,8433	28,3465	29,6027	30,9285	32,0068	33,0125	33,7076	35,0628
Cartões	26	29	32	36	40	45	50	inf

Tabela 7 - Resultados do CONWIP usando a regra de prioridade SPT

Ptardy	11,7611	13,5507	17,7602	25,3623	29,8873	25,9838	22,1443	15,9727
Std lateness	284,26	263,15	220,46	153,8	92,6578	45,9162	29,4327	14,8039
lateness	23,9046	23,8687	20,7803	11,6171	1,2784	-8,1009	-11,37	-14,94
TTS	73,9094	73,8739	70,786	61,6226	51,2841	41,904	38,6364	35,0628
TEF	29,168	32,1492	34,667	36,2969	36,2453	35,4269	35,2288	35,0628
Cartões	26	29	32	36	40	45	50	inf

A2 – GPOLCA

Tabela 8 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade PRT e igual número de cartões por *loop*

Ptardy	42,2585	30,6182	24,4007	20,9771	18,2101	17,1236	16,4904	15,9727
Std lateness	24,1689	19,987	17,7957	16,5079	15,4875	15,1637	14,9382	14,8039
lateness	2,2351	-6,5669	-10,39	-12,37	-13,88	-14,38	-14,7	-14,94
TTS	52,2401	43,4383	39,6188	37,6377	36,1262	35,6284	35,3078	35,0628
TEF	27,3779	28,7787	29,9594	30,937	32,2412	33,0155	33,7076	35,0628
Cartões	26	29	32	36	40	45	50	inf

Tabela 9 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade PRT e diferente número de cartões por *loop*

	Ptardy	20,9004	17,8072	16,816	16,3083	16,0625	16,0049	15,9849	15,9727
	Std lateness	16,389	15,3532	15,0229	14,8736	14,8211	14,8103	14,8052	14,8039
	lateness	-12,55	-14,1	-14,58	-14,81	-14,9	-14,93	-14,94	-14,94
	TTS	37,4543	35,9094	35,4223	35,1973	35,103	35,0767	35,0664	35,0628
	TEF	29,434	31,057	32,0844	32,8988	33,5917	33,9806	34,257	35,0628
Cartões	CT1_CT2	14	16	18	20	23	25	27	inf
	CT2_CT3	20	24	27	30	34	37	40	inf
	CT3_CT4	27	31	35	40	44	49	53	inf
	CT4_CT5	33	39	44	50	55	61	66	inf
	CT5_CT6	40	47	53	60	67	73	80	inf

Tabela 10 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade FIFO e diferente número de cartões por *loop*

	Ptardy	20,9367	17,8002	16,8119	16,2908	16,0633	16,0023	15,9837	15,9727
	Std lateness	16,4139	15,357	15,0279	14,8734	14,822	14,8104	14,8052	14,8039
	lateness	-12,54	-14,1	-14,58	-14,81	-14,9	-14,93	-14,94	-14,94
	TTS	37,4634	35,9058	35,4222	35,1941	35,1044	35,0773	35,0662	35,0628
	TEF	29,4325	31,0568	32,0863	32,896	33,5919	33,9813	34,2566	35,0628
Cartões	CT1_CT2	14	16	18	20	23	25	27	inf
	CT2_CT3	20	24	27	30	34	37	40	inf
	CT3_CT4	27	31	35	40	44	49	53	inf
	CT4_CT5	33	39	44	50	55	61	66	inf
	CT5_CT6	40	47	53	60	67	73	80	inf

Tabela 11 - Resultados do GPOLCA usando a regra de prioridade SPT e diferente número de cartões por *loop*

	Ptardy	8,3378	8,5538	9,8673	13,5136	15,8456	16,5137	16,5268	15,9727
	Std lateness	298,83	237,74	139,1	75,1827	46,7097	30,1367	21,5731	14,8039
	lateness	16,0665	12,0691	1,6017	-6,9202	-10,54	-12,72	-14,09	-14,94
	TTS	66,0721	62,0752	51,6077	43,0852	39,4672	37,2808	35,916	35,0628
	TEF	23,8397	27,9573	31,0337	32,1901	32,8604	33,4173	33,8446	35,0628
Cartões	CT1_CT2	9	11	14	16	18	20	23	inf
	CT2_CT3	13	17	20	24	27	30	34	inf
	CT3_CT4	18	22	27	31	35	40	44	inf
	CT4_CT5	22	28	33	39	44	50	55	inf
	CT5_CT6	27	33	40	47	53	60	67	inf

A3 – GKS

Tabela 12 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT e igual número de cartões por *loop*

Ptardy	42,2585	30,6182	24,4007	20,9771	18,2101	17,1236	16,4904	15,9727
Std lateness	24,1689	19,987	17,7957	16,5079	15,4875	15,1637	14,9382	14,8039
lateness	2,2351	-6,5669	-10,39	-12,37	-13,88	-14,38	-14,7	-14,94
TTS	52,2401	43,4383	39,6188	37,6377	36,1262	35,6284	35,3078	35,0628
TEF	27,3779	28,7787	29,9594	30,937	32,2412	33,0155	33,7076	35,0628
Cartões	26	29	32	36	40	45	50	inf

Tabela 13 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-100%

Ptardy		20,9056	17,8129	16,8053	16,2968	16,0632	16,005	15,9838	15,9727
Std lateness		16,3889	15,3578	15,0241	14,8731	14,8217	14,816	14,8066	14,8039
lateness		-12,55	-14,09	-14,58	-14,81	-14,9	-14,93	-14,94	-14,94
TTS		37,4561	35,9153	35,4252	35,1988	35,1051	35,0787	35,0687	35,0628
TEF		28,5045	30,0858	31,1199	31,9604	32,641	33,0923	33,4347	35,0628
Cartões	CT1	6	7	8	9	10	11	12	inf
	CT2	14	16	18	20	23	25	27	inf
	CT3	20	24	27	30	34	37	40	inf
	CT4	27	31	35	40	44	49	53	inf
	CT5	33	39	44	50	55	61	66	inf
	CT6	40	47	53	60	67	73	80	inf

Tabela 14 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-33%

Ptardy		18,1026	15,9156	15,137	14,9375	14,9388	15,0024	15,161	15,9727
Std lateness		15,7386	14,9439	14,6767	14,6206	14,5721	14,5975	14,6525	14,8039
lateness		-13,94	-14,97	-15,31	-15,4	-15,4	-15,37	-15,26	-14,94
TTS		36,062	35,0371	34,6929	34,6006	34,602	34,6395	34,7414	35,0628
TEF		27,4982	28,8707	30,0717	31,0375	31,7466	32,2905	33,1416	35,0628
Cartões	CT1	7	8	9	10	11	12	14	inf
	CT2	16	18	20	23	25	27	32	inf
	CT3	24	27	30	34	37	40	47	inf
	CT4	31	35	40	44	49	53	62	inf
	CT5	39	44	50	55	61	66	77	inf
	CT6	47	53	60	67	73	80	93	inf

Tabela 15 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade PRT, diferente número de cartões por *loop* e com amplitude do cartão 0-20%

Ptardy		15,0327	14,1786	13,9223	13,8769	14,1736	14,3889	14,8002	15,9727
Std lateness		14,9019	14,547	14,38	14,3553	14,4151	14,4669	14,5922	14,8039
lateness		-15,3	-15,71	-15,85	-15,86	-15,73	-15,62	-15,43	-14,94
TTS		34,7067	34,2957	34,1594	34,1412	34,2757	34,3845	34,5732	35,0628
TEF		26,8516	28,1115	29,1486	29,9469	31,3116	32,2049	32,8972	35,0628
Cartões	CT1	9	10	11	12	14	16	18	inf
	CT2	20	23	25	27	32	36	41	inf
	CT3	30	34	37	40	47	54	60	inf
	CT4	40	44	49	53	62	71	80	inf
	CT5	50	55	61	66	77	89	100	inf
	CT6	60	67	73	80	93	107	120	inf

Tabela 16 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade FIFO e diferente número de cartões por *loop*

Ptardy		21,1007	17,9523	16,8565	16,3219	16,0881	16,0066	15,9749	15,9727
Std lateness		16,472	15,4115	15,0595	14,8854	14,8351	14,8199	14,8095	14,8039
lateness		-12,51	-14,07	-14,56	-14,8	-14,89	-14,92	-14,94	-14,94
TTS		37,4964	35,9384	35,4448	35,2018	35,1119	35,0817	35,0679	35,0628
TEF		28,5018	30,0821	31,1248	31,9585	32,6421	33,0931	33,4335	35,0628
Cartões	CT1	6	7	8	9	10	11	12	inf
	CT2	14	16	18	20	23	25	27	inf
	CT3	20	24	27	30	34	37	40	inf
	CT4	27	31	35	40	44	49	53	inf
	CT5	33	39	44	50	55	61	66	inf
	CT6	40	47	53	60	67	73	80	inf

Tabela 17 - Resultados do GKS usando a regra de prioridade SPT e diferente número de cartões por *loop*

Ptardy		5,2924	8,2109	10,9424	12,6212	13,6077	14,0234	14,4073	15,9727
Std lateness		72,5018	44,1688	31,0203	24,4307	19,9207	18,0922	16,7512	14,8039
lateness		-10,94	-13,63	-14,67	-15,12	-15,39	-15,4	-15,36	-14,94
TTS		39,0614	36,3763	35,3353	34,8868	34,6139	34,6099	34,648	35,0628
TEF		28,4163	29,9714	31,01	31,8342	32,4884	32,9546	33,3476	35,0628
Cartões	CT1	6	7	8	9	10	11	12	inf
	CT2	14	16	18	20	23	25	27	inf
	CT3	20	24	27	30	34	37	40	inf
	CT4	27	31	35	40	44	49	53	inf
	CT5	33	39	44	50	55	61	66	inf
	CT6	40	47	53	60	67	73	80	inf

A4 – Workload Bounding

Tabela 18 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade PRT em ambiente PFS

Ptardy	6,8519	6,5907	8,2433	11,1757	13,1271	14,2638	15,0741	15,9727
Std lateness	15,7527	14,6268	13,9236	14,0179	14,2781	14,5232	14,7086	14,8039
lateness	-19,3	-18,68	-17,95	-16,91	-16,19	-15,66	-15,31	-14,94
TTS	30,7095	31,3287	32,0538	33,0913	33,8183	34,3405	34,6908	35,0628
TEF	20,337	23,6893	26,6503	29,4777	31,508	32,9332	33,8803	35,0628
Norma carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

Tabela 19 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade TWK em ambiente PFS

Ptardy	5,1569	4,1067	4,9298	8,4287	11,4337	13,23	14,4761	15,9727
Std lateness	17,726	16,0523	14,9734	14,5816	14,5593	14,7352	14,8168	14,8039
lateness	-21,6	-20,49	-19,2	-17,85	-16,82	-16,05	-15,52	-14,94
TTS	28,7407	29,5137	30,8061	32,152	33,1525	33,9591	34,4898	35,0628
TEF	19,4561	22,8213	25,9244	28,8719	31,057	32,6489	33,7217	35,0628
Norma Carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

Tabela 20 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade SPT em ambiente PFS

Ptardy	4,6625	3,416	2,8662	6,0332	10,4608	12,695	14,1118	15,9727
Std lateness	30,2341	22,415	17,8933	15,8211	15,1927	15,0264	14,9487	14,8039
lateness	-22,31	-21,28	-19,93	-18,37	-17,1	-16,24	-15,65	-14,94
TTS	27,6922	28,7241	30,0769	31,6308	32,9028	33,7668	34,3536	35,0628
TEF	19,2738	22,6397	25,7834	28,7637	31,0406	32,6146	33,6818	35,0628
Norma Carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

Tabela 21 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade PRT em ambiente GFS

Ptardy	5,7397	4,4585	3,9758	5,5842	9,1072	12,3232	13,9567	14,9913
Std lateness	47,8142	23,3053	17,7444	15,2102	13,5751	12,785	12,3986	12,2121
lateness	-15,49	-15,7	-15,05	-14,11	-13,34	-12,76	-12,4	-12,1
TTS	19,5138	19,3002	19,9503	20,8923	21,6589	22,2464	22,6001	22,904
TEF	11,1744	13,43	15,6102	17,8167	19,5949	20,9596	21,8939	22,904
Norma Carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

Tabela 22 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade TWK em ambiente GFS

Ptardy	5,7553	4,3983	3,6535	4,575	7,939	11,4792	13,4208	14,9913
Std lateness	48,8185	23,9666	18,6369	15,8689	14,0804	13,1143	12,5623	12,2121
lateness	-15,77	-16,03	-15,34	-14,39	-13,58	-12,93	-12,5	-12,1
TTS	19,2345	18,969	19,6625	20,613	21,4253	22,0704	22,5028	22,904
TEF	11,0007	13,2108	15,3781	17,5829	19,3862	20,8005	21,8047	22,904
Norma Carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

Tabela 23 - Resultados do Workload Bounding usando a regra de prioridade SPT em ambiente GFS

Ptardy	5,6825	4,3552	3,4092	3,9635	7,1272	10,8584	13,0488	14,9913
Std lateness	53,7484	25,1578	19,3951	16,4273	14,4803	13,3107	12,6725	12,2121
lateness	-15,97	-16,37	-15,66	-14,63	-13,74	-13,06	-12,59	-12,1
TTS	19,034	18,6359	19,3399	20,3749	21,2573	21,9424	22,4157	22,904
TEF	10,8722	13,0842	15,2705	17,5068	19,3393	20,7624	21,777	22,904
Norma Carga	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	14	inf

A5 – Workload Balancing

Tabela 24 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade PRT em ambiente PFS

Ptardy	4,9763	5,4989	7,7198	10,2882	12,2736	13,7364	14,6559	15,9727
Std lateness	16,8434	15,3799	14,6474	14,3172	14,2258	14,42	14,5529	14,8039
lateness	-20,15	-19,15	-18,15	-17,2	-16,47	-15,86	-15,47	-14,94
TTS	29,8506	30,858	31,8597	32,802	33,5357	34,1498	34,5343	35,0628
TEF	21,8793	25,1415	27,7089	29,867	31,6198	32,9068	33,7588	35,0628
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	inf

Tabela 25 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade TWK em ambiente PFS

Ptardy	4,1619	4,163	6,8939	10,0503	12,0592	13,4812	14,429	15,9727
Std lateness	17,8779	16,1271	15,1924	14,8864	14,8002	14,8472	14,8979	14,8039
lateness	-21,26	-19,8	-18,52	-17,42	-16,56	-15,94	-15,53	-14,94
TTS	28,7447	30,2003	31,4852	32,5867	33,4414	34,061	34,4769	35,0628
TEF	21,3172	24,7426	27,472	29,7327	31,5659	32,8383	33,7	35,0628
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	inf

Tabela 26 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade SPT em ambiente PFS

Ptardy	3,6814	3,0226	5,0387	8,6562	11,3157	12,8793	14,0672	15,9727
Std lateness	21,1017	17,6049	16,1599	15,4887	15,0883	14,9532	14,9517	14,8039
lateness	-22,1	-20,48	-19,02	-17,82	-16,81	-16,16	-15,67	-14,94
TTS	27,903	29,5233	30,9823	32,1901	33,1904	33,8404	34,3388	35,0628
TEF	21,2913	24,6726	27,3605	29,5761	31,4416	32,6983	33,6136	35,0628
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9	11,2	inf

Tabela 27 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade PRT em ambiente GFS

Ptardy	4,9546	4,0095	4,7024	7,1606	10,5949	12,6797	13,823	14,9913
Std lateness	25,9646	17,4097	14,9829	13,7288	13,02	12,6777	12,4466	12,2121
lateness	-16,17	-15,6	-14,69	-13,85	-13,12	-12,65	-12,38	-12,1
TTS	18,8327	19,4057	20,313	21,1551	21,8831	22,3508	22,6236	22,904
TEF	12,5893	15,0446	17,1135	18,9058	20,4654	21,5271	22,1884	22,904
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9,0	11,2	inf

Tabela 28 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade TWK em ambiente GFS

Ptardy	4,9339	3,8026	4,0826	6,4768	10,2465	12,5627	13,7866	14,9913
Std lateness	26,348	18,4278	15,9005	14,3701	13,3767	12,7921	12,4898	12,2121
lateness	-16,41	-15,79	-14,86	-13,97	-13,19	-12,69	-12,39	-12,1
TTS	18,5881	19,2137	20,1416	21,03	21,8095	22,3144	22,6109	22,904
TEF	12,4226	14,8685	16,9469	18,7893	20,4043	21,5086	22,19	22,904
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9,0	11,2	inf

Tabela 29 - Resultados do Workload Balancing usando a regra de prioridade SPT em ambiente GFS

Ptardy	4,7423	3,5659	3,5765	5,8319	9,7756	12,3066	13,668	14,9913
Std lateness	28,2871	19,0669	16,2989	14,6048	13,5022	12,8834	12,4916	12,2121
lateness	-16,68	-16,07	-15,08	-14,14	-13,29	-12,74	-12,43	-12,1
TTS	18,3265	18,9298	19,921	20,8621	21,7147	22,2599	22,5736	22,904
TEF	12,3277	14,776	16,8774	18,7175	20,3622	21,4802	22,168	22,904
Norma Carga	2,9	3,7	4,6	5,7	7,2	9,0	11,2	inf

ANEXO B – MODELOS DE SIMULAÇÃO

B1 – Código SIMAN para o modelo de simulação do mecanismo GKS numa PFS com regra de prioridade PRT e amplitude cartão 0-20%

```
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Create 2 (Order Entry)
;
115$          CREATE,        1,HoursToBaseTime(0.0),Materia_Prima:HoursToBaseTime(EXPO(1.1)):NEXT(116$);
116$          ASSIGN:        Order Entry.NumberOut=Order Entry.NumberOut + 1:NEXT(70$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Separate 2 (Separate 2)
;
70$           DUPLICATE,     100 - 50:
                    1,121$,50:NEXT(120$);
120$          ASSIGN:        Separate 2.NumberOut Orig=Separate 2.NumberOut Orig + 1:NEXT(24$);
121$          ASSIGN:        Separate 2.NumberOut Dup=Separate 2.NumberOut Dup + 1:NEXT(71$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 10 (Truncated Erlang 1)
;
24$           ASSIGN:        Truncated Erlang 1.NumberIn=Truncated Erlang 1.NumberIn + 1:
                    Truncated Erlang 1.WIP=Truncated Erlang 1.WIP+1:NEXT(25$);
25$           ASSIGN:        TP1=ERLA(mean,2):NEXT(26$);
26$           BRANCH,        1:
                    If,TP1>4*mean*2,173$,Yes:
                    Else,174$,Yes;
173$          ASSIGN:        Decide 2.NumberOut True=Decide 2.NumberOut True + 1:NEXT(25$);
174$          ASSIGN:        Decide 2.NumberOut False=Decide 2.NumberOut False + 1:NEXT(27$);
27$           ASSIGN:        TP2=ERLA(mean,2):NEXT(28$);
28$           BRANCH,        1:
                    If,TP2>4*mean*2,175$,Yes:
```

```
                    Else,176$,Yes;
175$        ASSIGN:       Decide 3.NumberOut True=Decide 3.NumberOut True + 1:NEXT(27$);
176$        ASSIGN:       Decide 3.NumberOut False=Decide 3.NumberOut False + 1:NEXT(29$);
29$         ASSIGN:       TP3=ERLA(mean,2):NEXT(30$);
30$         BRANCH,       1:
                    If,TP3>4*mean*2,177$,Yes:
                    Else,178$,Yes;
177$        ASSIGN:       Decide 4.NumberOut True=Decide 4.NumberOut True + 1:NEXT(29$);
178$        ASSIGN:       Decide 4.NumberOut False=Decide 4.NumberOut False + 1:NEXT(31$);
31$         ASSIGN:       TP4=ERLA(mean,2):NEXT(32$);
32$         BRANCH,       1:
                    If,TP4>4*mean*2,179$,Yes:
                    Else,180$,Yes;
179$        ASSIGN:       Decide 5.NumberOut True=Decide 5.NumberOut True + 1:NEXT(31$);
180$        ASSIGN:       Decide 5.NumberOut False=Decide 5.NumberOut False + 1:NEXT(33$);
33$         ASSIGN:       TP5=ERLA(mean,2):NEXT(34$);
34$         BRANCH,       1:
                    If,TP5>4*mean*2,181$,Yes:
                    Else,182$,Yes;
181$        ASSIGN:       Decide 6.NumberOut True=Decide 6.NumberOut True + 1:NEXT(33$);
182$        ASSIGN:       Decide 6.NumberOut False=Decide 6.NumberOut False + 1:NEXT(35$);
35$         ASSIGN:       TP6=ERLA(mean,2):NEXT(36$);
36$         BRANCH,       1:
                    If,TP6>4*mean*2,183$,Yes:
                    Else,184$,Yes;
183$        ASSIGN:       Decide 7.NumberOut True=Decide 7.NumberOut True + 1:NEXT(35$);
184$        ASSIGN:       Decide 7.NumberOut False=Decide 7.NumberOut False + 1:NEXT(170$);
170$        ASSIGN:       Truncated Erlang 1.NumberOut=Truncated Erlang 1.NumberOut + 1:
                    Truncated Erlang 1.WIP=Truncated Erlang 1.WIP-1:NEXT(60$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 22 (PFS)
;
60$         ASSIGN:       index1=1:
                    index2=2:
```

```
                    index3=3:
                    index4=4:
                    index5=5:
                    index6=6:
                    numop=6:NEXT(78$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 11 (Range 5 cartoes)
;
78$         ASSIGN:     Range 5 cartoes.NumberIn=Range 5 cartoes.NumberIn + 1:
                    Range 5 cartoes.WIP=Range 5 cartoes.WIP+1:NEXT(79$);
79$         BRANCH,     1:
                    If,TP1<=0.8,80$,Yes:
                    If,(TP1>0.8).and.(TP1<=1.6),81$,Yes:
                    If,(TP1>1.6).and.(TP1<=2.4),82$,Yes:
                    If,(TP1>2.4).and.(TP1<=3.2),98$,Yes:
                    Else,99$,Yes;
99$         ASSIGN:     load1=5:NEXT(100$);
100$        BRANCH,     1:
                    If,TP2<=0.8,83$,Yes:
                    If,(TP2>0.8).and.(TP2<=1.6),84$,Yes:
                    If,(TP2>1.6).and.(TP2<=2.4),85$,Yes:
                    If,(TP2>2.4).and.(TP2<=3.2),101$,Yes:
                    Else,102$,Yes;
102$        ASSIGN:     load2=5:NEXT(103$);
103$        BRANCH,     1:
                    If,TP3<=0.8,86$,Yes:
                    If,(TP3>0.8).and.(TP3<=1.6),88$,Yes:
                    If,(TP3>1.6).and.(TP3<=2.4),87$,Yes:
                    If,(TP3>2.4).and.(TP3<=3.2),104$,Yes:
                    Else,105$,Yes;
105$        ASSIGN:     load3=5:NEXT(106$);
106$        BRANCH,     1:
                    If,TP4<=0.8,89$,Yes:
                    If,(TP4>0.8).and.(TP4<=1.6),90$,Yes:
```

```
                    If,(TP4>1.6).and.(TP4<=2.4),91$,Yes:
                    If,(TP4>2.4).and.(TP4<=3.2),107$,Yes:
                    Else,108$,Yes;
108$        ASSIGN:     load4=5:NEXT(109$);
109$        BRANCH,     1:
                    If,TP5<=0.8,92$,Yes:
                    If,(TP5>0.8).and.(TP5<=1.6),93$,Yes:
                    If,(TP5>1.6).and.(TP5<=2.4),94$,Yes:
                    If,(TP5>2.4).and.(TP5<=3.2),110$,Yes:
                    Else,111$,Yes;
111$        ASSIGN:     load5=5:NEXT(112$);
112$        BRANCH,     1:
                    If,TP6<=0.8,95$,Yes:
                    If,(TP6>0.8).and.(TP6<=1.6),96$,Yes:
                    If,(TP6>1.6).and.(TP6<=2.4),97$,Yes:
                    If,(TP6>2.4).and.(TP6<=3.2),113$,Yes:
                    Else,114$,Yes;
114$        ASSIGN:     load6=5:NEXT(233$);
95$         ASSIGN:     load6=1:NEXT(233$);
96$         ASSIGN:     load6=2:NEXT(233$);
97$         ASSIGN:     load6=3:NEXT(233$);
113$        ASSIGN:     load6=4:NEXT(233$);
92$         ASSIGN:     load5=1:NEXT(112$);
93$         ASSIGN:     load5=2:NEXT(112$);
94$         ASSIGN:     load5=3:NEXT(112$);
110$        ASSIGN:     load5=4:NEXT(112$);
89$         ASSIGN:     load4=1:NEXT(109$);
90$         ASSIGN:     load4=2:NEXT(109$);
91$         ASSIGN:     load4=3:NEXT(109$);
107$        ASSIGN:     load4=4:NEXT(109$);
86$         ASSIGN:     load3=1:NEXT(106$);
88$         ASSIGN:     load3=2:NEXT(106$);
87$         ASSIGN:     load3=3:NEXT(106$);
104$        ASSIGN:     load3=4:NEXT(106$);
83$         ASSIGN:     load2=1:NEXT(103$);
```

```
84$          ASSIGN:       load2=2:NEXT(103$);
85$          ASSIGN:       load2=3:NEXT(103$);
101$         ASSIGN:       load2=4:NEXT(103$);
80$          ASSIGN:       load1=1:NEXT(100$);
81$          ASSIGN:       load1=2:NEXT(100$);
82$          ASSIGN:       load1=3:NEXT(100$);
98$          ASSIGN:       load1=4:NEXT(100$);
233$         ASSIGN:       Range 5 cartoes.NumberOut=Range 5 cartoes.NumberOut + 1:
                           Range 5 cartoes.WIP=Range 5 cartoes.WIP-1:NEXT(0$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 1 (Criar tag para produto)
;
0$           ASSIGN:       Tempo_entrada=TNOW:
                           Data Entrega=TNOW+UNIF(40, 60):
                           station1=1:
                           station2=1:
                           station3=1:
                           station4=1:
                           station5=1:
                           station6=1:
                           PRD=
                           Data Entrega - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6
                           :NEXT(66$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Hold 1 (Hold 1)
;
66$          QUEUE,        Preshop Pool.Queue;
             WAIT:         1001:NEXT(68$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Decide 9 (Decide 9)
;
```

```
68$          BRANCH,       1:
                           If,
                           (loadCT1+load1<= ub1).and. (loadCT2+load2<= ub2).and.(loadCT3+load3<=
ub3).and.(loadCT4+load4<= ub4).and.(loadCT5+load5<= ub5).and.(loadCT6+load6<= ub6),
                           248$,Yes:
                           Else,249$,Yes;
248$         ASSIGN:       Decide 9.NumberOut True=Decide 9.NumberOut True + 1:NEXT(12$);
249$         ASSIGN:       Decide 9.NumberOut False=Decide 9.NumberOut False + 1:NEXT(66$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 5 (registar lancamento)
;
12$          ASSIGN:       Tempo_lancamento=TNOW:
                           loadCT1=LoadCT1+load1:
                           loadCT2=LoadCT2+load2:
                           loadCT3=LoadCT3+load3:
                           loadCT4=LoadCT4+load4:
                           LoadCT5=LoadCT5+load5:
                           LoadCT6=LoadCT6+load6:NEXT(1$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 3 (Order release)
;
1$           ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index1);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 7 (Signal 7)
;
71$          SIGNAL:       1001:NEXT(72$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Dispose 2 (Dispose 2)
;
72$          ASSIGN:       Dispose 2.NumberOut=Dispose 2.NumberOut + 1;
250$         DISPOSE:      Yes;
```

```
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Station 5 (estatistica_station)
;
14$          STATION,       estatistica_station;
253$         DELAY:         0.0,,VA:NEXT(17$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Decide 1 (Em atrasado?)
;
17$          BRANCH,        1:
                            If,Data Entrega < TNOW,254$,Yes:
                            Else,255$,Yes;
254$         ASSIGN:        Em atrasado?.NumberOut True=Em atrasado?.NumberOut True + 1:NEXT(38$);

255$         ASSIGN:        Em atrasado?.NumberOut False=Em atrasado?.NumberOut False + 1:NEXT(39$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 9 (Record 9)
;
38$          COUNT:         atrasados,1:NEXT(40$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 11 (Atraso)
;
40$          TALLY:         lateness,TNOW-Data Entrega,1:NEXT(3$);



;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 1 (TroughtputRate)
;
3$           TALLY:         taxa saida,BET,1:NEXT(5$);
;
;
```

```
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 3 (Producao)
;
5$           COUNT:         Producao,1:NEXT(4$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 2 (Flowtime)
;
4$           TALLY:         flowtime,INT(Tempo_lancamento),1:NEXT(15$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 7 (TotalFlowtime)
;
15$          TALLY:         Totalflowtime,INT(Tempo_entrada),1:NEXT(2$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Dispose 1 (Final_Linha_Producao)
;
2$           ASSIGN:        Final_Linha_Producao.NumberOut=Final_Linha_Producao.NumberOut + 1;
256$         DISPOSE:       Yes;
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 10 (Record 10)
;
39$          COUNT:         antecipados,1:NEXT(40$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 1 (Enter 1)
;
41$          STATION,       Enter 1.Station;
257$         DELAY:         0.,,VA:NEXT(263$);

263$         DELAY:         0.000,,VA:NEXT(18$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 9 (Assign 9)
```

```
;
18$          ASSIGN:        PST1=
                            Data Entrega  - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
                            station1=0:NEXT(6$);



;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 1 (CT1)
;
6$           ASSIGN:        CT1.NumberIn=CT1.NumberIn + 1:
                            CT1.WIP=CT1.WIP+1;
271$         QUEUE,         CT1.Queue;
270$         SEIZE,         2,VA:
                            operario1,1:NEXT(269$);
269$         DELAY:         TP1,,VA;
268$         RELEASE:       operario1,1;
316$         ASSIGN:        CT1.NumberOut=CT1.NumberOut + 1:
                            CT1.WIP=CT1.WIP-1:NEXT(61$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 24 (Assign 31)
;
61$          ASSIGN:        loadCT1=LoadCT1- load1:
                            numop=numop-1:
                            step=step+1:NEXT(77$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 12 (Signal 12)
;
77$          SIGNAL:        1001:NEXT(47$);



;
```

```
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 5 (Route 1)
;
47$          ROUTE:        0.000000000000000,Enter 100.Station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 2 (Enter 2)
;
42$          STATION,      Enter 2.Station;
319$         DELAY:        0.,,VA:NEXT(325$);

325$         DELAY:        0.000,,VA:NEXT(19$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 11 (Assign 11)
;
19$          ASSIGN:       PST2=
                           Data Entrega - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
                           station2=0:
                           tempoIN2=TNOW:NEXT(7$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 2 (CT2)
;
7$           ASSIGN:       CT2.NumberIn=CT2.NumberIn + 1:
                           CT2.WIP=CT2.WIP+1;
333$         QUEUE,        CT2.Queue;
332$         SEIZE,        2,VA:
                           operario2,1:NEXT(331$);
331$         DELAY:        TP2,,VA;
330$         RELEASE:      operario2,1;
378$         ASSIGN:       CT2.NumberOut=CT2.NumberOut + 1:
                           CT2.WIP=CT2.WIP-1:NEXT(62$);
;
```

```
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 25 (Assign 32)
;
62$          ASSIGN:       loadCT2=LoadCT2-load2:
                           numop=numop-1:
                           step=step+1:NEXT(37$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Record 8 (Record 8)
;
37$          TALLY:        flowtime 2,INT(tempoIN2),1:NEXT(76$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 11 (Signal 11)
;
76$          SIGNAL:       1001:NEXT(48$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 6 (Route 2)
;
48$          ROUTE:        0.000000000000000,Enter 100.Station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 3 (Enter 3)
;
43$          STATION,      Enter 3.Station;
381$         DELAY:        0.,,VA:NEXT(387$);
387$         DELAY:        0.000,,VA:NEXT(20$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 12 (Assign 12)
;
20$          ASSIGN:       PST3=
                           Data Entrega  - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
```

```
                    station3=0:NEXT(8$);


;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 3 (CT3)
;
8$          ASSIGN:       CT3.NumberIn=CT3.NumberIn + 1:
                    CT3.WIP=CT3.WIP+1;
395$        QUEUE,        CT3.Queue;
394$        SEIZE,        2,VA:
                    operario3,1:NEXT(393$);
393$        DELAY:        TP3,,VA;
392$        RELEASE:      operario3,1;
440$        ASSIGN:       CT3.NumberOut=CT3.NumberOut + 1:
                    CT3.WIP=CT3.WIP-1:NEXT(63$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 26 (Assign 33)
;
63$         ASSIGN:       loadCT3=LoadCT3-load3:
                    numop=numop-1:
                    step=step+1:NEXT(75$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 10 (Signal 10)
;
75$         SIGNAL:       1001:NEXT(49$);


;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 7 (Route 3)
;
49$         ROUTE:        0.000000000000000,Enter 100.Station;
```

```
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 4 (Enter 4)
;
44$          STATION,       Enter 4.Station;
443$         DELAY:         0.,,VA:NEXT(449$);
449$         DELAY:         0.000,,VA:NEXT(21$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 13 (Assign 13)
;
21$          ASSIGN:        PST4=
                            Data Entrega - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
                            station4=0:NEXT(9$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 4 (CT4)
;
9$           ASSIGN:        CT4.NumberIn=CT4.NumberIn + 1:
                            CT4.WIP=CT4.WIP+1;
457$         QUEUE,         CT4.Queue;
456$         SEIZE,         2,VA:
                            operario4,1:NEXT(455$);
455$         DELAY:         TP4,,VA;
454$         RELEASE:       operario4,1;
502$         ASSIGN:        CT4.NumberOut=CT4.NumberOut + 1:
                            CT4.WIP=CT4.WIP-1:NEXT(64$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 27 (Assign 27)
;
64$          ASSIGN:        loadCT4=LoadCT4-load4:
                            numop=numop-1:
                            step=step+1:NEXT(74$);
```

```
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 9 (Signal 9)
;
74$          SIGNAL:       1001:NEXT(50$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 8 (Route 4)
;
50$          ROUTE:        0.000000000000000,Enter 100.Station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 5 (Enter 5)
;
45$          STATION,      Enter 5.Station;
505$         DELAY:        0.,,VA:NEXT(511$);
511$         DELAY:        0.000,,VA:NEXT(22$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 14 (Assign 14)
;
22$          ASSIGN:       PST5=
                           Data Entrega - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
                           station5=0:NEXT(10$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 5 (CT5)
;
10$          ASSIGN:       CT5.NumberIn=CT5.NumberIn + 1:
                           CT5.WIP=CT5.WIP+1;
519$         QUEUE,        CT5.Queue;
518$         SEIZE,        2,VA:
                           operario5,1:NEXT(517$);
517$         DELAY:        TP5,,VA;
```

```
516$          RELEASE:       operario5,1;
564$          ASSIGN:        CT5.NumberOut=CT5.NumberOut + 1:
                             CT5.WIP=CT5.WIP-1:NEXT(65$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 29 (Assign 29)
;
65$           ASSIGN:        LoadCT5=LoadCT5-load5:
                             numop=numop-1:
                             step=step+1:NEXT(73$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 8 (Signal 8)
;
73$           SIGNAL:        1001:NEXT(51$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 9 (Route 5)
;
51$           ROUTE:         0.000000000000000,Enter 100.Station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 6 (Enter 6)
;
46$           STATION,       Enter 6.Station;
567$          DELAY:         0.,,VA:NEXT(573$);
573$          DELAY:         0.000,,VA:NEXT(23$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 15 (Assign 15)
;
23$           ASSIGN:        PST6=
                             Data Entrega - LTimeN*station1 - LTimeN*station2 - LTimeN*station3 - LTimeN*station4 -
LTimeN*station5 - LTimeN*station6:
                             station6=0:NEXT(11$);
```

```
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Process 6 (CT6)
;
11$          ASSIGN:       CT6.NumberIn=CT6.NumberIn + 1:
                           CT6.WIP=CT6.WIP+1;
581$         QUEUE,        CT6.Queue;
580$         SEIZE,        2,VA:
                           operario6,1:NEXT(579$);
579$         DELAY:        TP6,,VA;
578$         RELEASE:      operario6,1;
626$         ASSIGN:       CT6.NumberOut=CT6.NumberOut + 1:
                           CT6.WIP=CT6.WIP-1:NEXT(16$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Assign 6 (decrementar WIP)
;
16$          ASSIGN:       LoadCT6=LoadCT6-load6:
                           numop=numop-1:
                           step=step+1:NEXT(69$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedProcess.Signal 5 (Signal 5)
;
69$          SIGNAL:       1001:NEXT(13$);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 4 (Route 6)
;
13$          ROUTE:        0.000000000000000,Enter 100.Station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Enter 8 (Enter 100)
;
52$          STATION,      Enter 100.Station;
```

```
629$          DELAY:        0.,,VA:NEXT(635$);
635$          DELAY:        0.000,,VA:NEXT(53$);
;
;
;    Model statements for module:  BasicProcess.Decide 8 (Decide 8)
;
53$           BRANCH,       1:
                        If,numop==0,59$,Yes:
                        If,step==1,54$,Yes:
                        If,step==2,55$,Yes:
                        If,step==3,56$,Yes:
                        If,step==4,57$,Yes:
                        If,step==5,58$,Yes:
                        Else,59$,Yes;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 15 (Route 71)
;
59$           ROUTE:        0.000000000000000,estatistica_station;
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 10 (Route 21)
;
54$           ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index2);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 11 (Route 31)
;
55$           ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index3);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 12 (Route 41)
;
56$           ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index4);
;
```

```
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 13 (Route 51)
;
57$          ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index5);
;
;
;    Model statements for module:  AdvancedTransfer.Route 14 (Route 61)
;
58$          ROUTE:        0.000000000000000,Stationset(index6);
```

B2 – Modelo de simulação em Arena do mecanismo GKS numa PFS

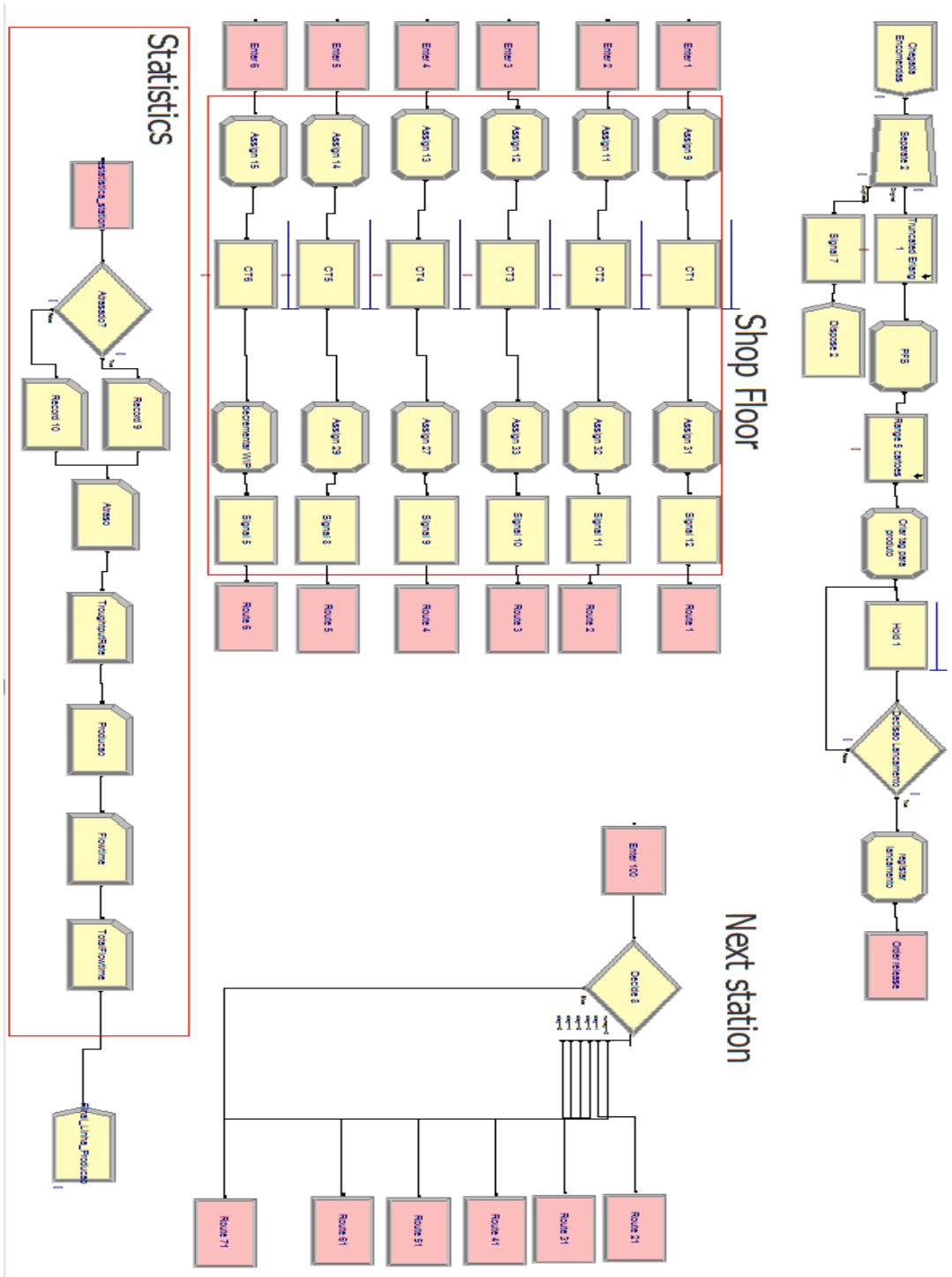

Figura 15 - Modelo de simulação em Arena do mecanismo GKS numa PFS