



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise comparativa de regras de lançamento utilizadas no Planeamento da Produção por Controlo de Carga

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

Autor

Ana Lúcia Mendes Ramos

Orientador

Professor Doutor Cristóvão Silva

Júri

Presidente Professora Doutora Marta Cristina Cardoso de Oliveira
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Cristóvão Silva

Vogais Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Luís Miguel Domingues F. Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Coimbra, julho, 2014

À minha família e ao Diogo.

Agradecimentos

A realização do presente trabalho só foi possível devido à participação e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de transmitir o meu profundo agradecimento.

Ao Professor Cristóvão Silva, orientador desta tese, pelos conhecimentos que me transmitiu. As suas sugestões e a sua motivação foram fundamentais para a concretização dos objetivos deste trabalho.

Aos meus amigos, por me acompanharem tanto nos bons como nos maus momentos e terem sempre uma palavra de incentivo.

Ao Diogo, por estar sempre presente.

À minha irmã, à minha afilhada e ao meu primo, pelo apoio que me dão e por serem aquilo que são.

À minha avó, por tudo o que tem feito por mim e por ser uma pessoa extraordinária.

Aos meus pais, pelos princípios e valores com que me instituíram e fizeram de mim aquilo que eu sou hoje e, porque sem eles, nada disto teria sido possível. Obrigada por serem o meu porto de abrigo e por me encorajarem sempre quando eu acho que não sou capaz.

À minha restante família, por todo o apoio demonstrado, não só durante a realização deste trabalho, como ao longo da minha vida.

Resumo

O Controlo de Carga é uma abordagem de Planeamento e Controlo da Produção, com aplicação em pequenas e médias empresas com produção por encomenda, as quais, na maioria dos casos, têm uma configuração do tipo *Job Shop*. Esta abordagem tem como objetivo controlar a carga de trabalho existente no *shop floor* de um sistema produtivo, de modo a monitorizar os tempos de produção e, conseqüentemente, as datas de entrega das encomendas. Para isso, este conceito propõe que as encomendas, antes de darem entrada no *shop floor*, sejam retidas numa reserva e apenas sejam lançadas a tempo de cumprir a sua data de entrega, mantendo a carga no *shop floor* dentro dos limites previamente estabelecidos. Deste modo, o lançamento das encomendas para o *shop floor* é um aspeto chave do conceito Controlo de Carga. A decisão de lançamento é composta por uma decisão de sequenciamento, que estabelece a ordem de lançamento das encomendas; e por uma decisão de seleção, que determina o critério para escolher qual encomenda a ser libertada da reserva.

Este estudo evidencia a decisão de sequenciamento das encomendas, e pretende fornecer uma melhor compreensão de como a ordem de lançamento das encomendas influencia o desempenho do sistema produtivo. Para isso, recorre-se à simulação, onde são testadas quatro regras de lançamento que ordenam de forma diferente as encomendas que se encontram na reserva. Três dessas regras encontram-se descritas na literatura e a restante irá ser desenvolvida neste documento – regra de otimização.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que a regra de otimização apresenta um desempenho bastante satisfatório, em comparação com as outras regras. Assim, este estudo mostra que o sequenciamento das encomendas na reserva influencia bastante o desempenho do sistema produtivo.

Palavras-chave: Planeamento e Controlo da Produção, Controlo de Carga, Lançamento de Encomendas, Reserva, Regras de Lançamento, Simulação.

Abstract

The Workload Control is a Production Planning and Control approach with application on small and medium-sized make-to-order companies, which do often have a Job Shop configuration. This approach objective is to control the shop floor workload of a productive system, to track production times and hence the delivery dates. For that, this concept suggests that before entering shop floor, the orders should be hold on a pre-shop pool and just being released in time to fulfil its delivery date while keeping the workload into pre-established limits. Seen this, the order release to shop floor is an essential element of the workload control concept. The release decision is constituted by a sequencing decision, which establish the release sequence of orders; and by a selection decision, that determines the criteria for choosing which order should be liberated from the pool.

This study emphasizes the sequencing decision of orders and pretends to provide a better knowing of how the release sequence of orders has influence on the productive system performance. Therefore four release rules are simulated, that sort by a different form the orders that are on the pool. Three of that rules are described on the literature and the other one will be developed on this document – optimization rule.

The results obtained on this study allow us to conclude that the optimization rule presents a satisfactory performance compared with the other rules. So, this study shows that the order sequencing on the pool has substantial influence on the productive system performance.

Keywords Production Planning and Control, Workload Control, Order Release, Pre-Shop Pool, Release Rules, Simulation.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. Introdução	1
2. Planeamento e Controlo da Produção por Controlo de Carga.....	5
2.1. A metodologia WLC	5
2.2. Lançamento de Encomendas.....	8
2.2.1. Decisão de Sequenciamento	9
2.2.2. Decisão de Seleção	10
3. Modelo de Simulação	11
3.1. Características do Sistema Produtivo	11
3.2. Características das Encomendas	12
3.3. Método de Lançamento das Encomendas.....	13
3.3.1. Regra de Otimização	14
3.3.2. Contabilização da Carga.....	15
3.4. Norma de Carga e Medidas de Desempenho.....	16
3.5. Descrição do Modelo de Simulação desenvolvido	17
3.5.1. Metodologia e Ferramentas utilizadas.....	17
3.5.2. Parâmetros da Simulação.....	19
3.5.3. Programação do Modelo de Simulação em VBA.....	20
4. Resultados da Simulação	27
5. Discussão dos resultados	35
6. Conclusões.....	41
Referências Bibliográficas.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática do conceito Controlo de Carga (Silva, 2000).....	6
Figura 2.2. Componentes do tempo de ciclo total considerados no conceito WLC (adaptado de Oosterman <i>et al.</i> , 2000).	7
Figura 3.1. Metodologia utilizada (Martins, 2012).	18
Figura 3.2. Fluxograma das rotinas programadas em VBA (Coelho, 2013).	21
Figura 4.1. Curvas de desempenho: Relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso.	30
Figura 4.2. Curvas de desempenho: Relação entre a percentagem de atraso e o tempo de percurso.	30
Figura 4.3. Curvas de desempenho: Relação entre o atraso médio e o tempo de percurso.	31
Figura 4.4. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso.....	33
Figura 4.5. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre a percentagem de atraso e o tempo de percurso.	33
Figura 4.6. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre o atraso médio e o tempo de percurso.	34

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Características do sistema produtivo.	12
Tabela 3.2. Características das encomendas.....	13
Tabela 3.3. Parâmetros utilizados na simulação.....	19
Tabela 4.1. Resultados obtidos com o modelo de simulação utilizando os parâmetros da Tabela 3.2.	29
Tabela 4.2. Características das encomendas utilizadas no estudo de Thüerer, <i>et al.</i>	31
Tabela 4.3. Resultados obtidos com o modelo de simulação utilizando os parâmetros da Tabela 4.2.	32
Tabela 5.1. Diferencial obtido com a aplicação do controlo no sistema para o caso em que o TCT é mínimo.	36

SIGLAS

DD – Delivery Date

EDD – Earliest Due Date

FCFS – First-Come-First-Served

MTO – Make-to-Order

MTS – Make-to-Stock

OPT – Optimization

PME – Pequenas e Médias Empresas

PRD – Planned Release Date

PPC – Production Planning and Control

PJS – Pure Job Shop

RL – Release Length

SAD – Sistema de Apoio à Decisão

TCT – Tempo de Ciclo Total

TPSF – Tempo de Passagem pelo *Shop Floor*

TPR – Tempo de Permanência na Reserva

VBA – Visual Basic for Applications

WIP – Work-in-Progress

WLC – Workload Control

1. INTRODUÇÃO

O Controlo de Carga (WLC – *Workload Control*) é um conceito de Planeamento e Controlo da Produção (PPC – *Production Planning and Control*), desenvolvido para contextos onde existe uma elevada variedade de produtos, tais como as pequenas e médias empresas (PME) com produção por encomenda (MTO – *Make-to-Order*), as quais, na maioria dos casos, têm uma configuração do tipo *Job Shop* (Hendry e Kingsman, 1989; Zäpfel e Missbauer, 1993; Stevenson *et al.*, 2005).

Devido à elevada variedade que existe em empresas MTO, onde o grau de customização dos produtos é elevado, não há rotas padronizadas no *shop floor*, o que conduz a um maior tempo de ciclo total (TCT) do que em empresas que produzem para *stock* (MTS – *Make-to-Stock*). O TCT tem bastante importância estratégica, isto porque, para além do preço, a data de entrega de entrega (DD – *Delivery Date*) é também um fator determinante para que uma empresa conquiste uma encomenda. Assim, em empresas MTO, existe uma grande necessidade de métodos sofisticados para controlar o TCT. O WLC é um sistema PPC que permite esse controlo. Este sistema tem como principais funções o planeamento do material necessário, o controlo das entradas e saídas e o agendamento e sequenciamento das encomendas, de modo a reduzir o trabalho em vias de fabrico (WIP – *Work-in-Progress*) e a suavizar o fluxo de encomendas, minimizando o tempo de passagem pelo *shop floor* (TPSF) e o prazo de entrega (Stevenson *et al.*, 2003).

O WLC remete para a utilização de uma reserva de encomendas, onde estas são mantidas até serem lançadas para o *shop floor*. Deste modo, o *shop floor* é isolado contra variações no fluxo de entrada de encomendas. A utilização da reserva permite também reduzir a congestão e o tamanho das filas de espera no *shop floor*, o que é bastante benéfico, pois o tempo que uma encomenda fica retida nas filas de espera representa a maioria do tempo que esta passa no *shop floor* (Stalk e Hout, 1990).

O lançamento das encomendas para o *shop floor* é um aspeto chave na abordagem WLC. As encomendas são sujeitas primeiramente a uma decisão de sequenciamento, a qual estabelece a sua ordem de lançamento (Thürer, *et al.*). Esta decisão pode ser sustentado por uma regra com base no tempo, onde as encomendas começam a ser

consideradas para lançamento de acordo com uma medida de urgência; ou então por uma regra com base na carga que a encomenda irá impor aos centros de trabalho.

A decisão de lançamento das encomendas engloba ainda uma decisão de seleção (Thürer, *et al.*), isto é, as encomendas apenas são lançadas se os limites de carga dos centros de trabalho afetados não forem excedidos, assegurando que as encomendas não permanecem demasiado tempo na reserva, e reduzindo o TCT de modo a cumprir a DD (Stevenson *et al.*, 2003). Assim, é necessária a especificação de normas de carga, planeamento de tempos no sistema, definir a frequência de lançamentos e um limite de tempo (Land, 2006). As normas de carga têm uma implicação direta no WIP. Quanto menor forem as normas impostas ao *shop floor*, menor será o WIP e mais rápida será a passagem das ordens de fabrico. Em contrapartida, a taxa de produção pode diminuir devido à falta de trabalho no *shop floor*, e o TCT pode aumentar pelo facto das ordens de fabrico ficarem retidas demasiado tempo na reserva. Aumentando o WIP aumenta-se a taxa de produção, visto que os postos de trabalho não ficarão subcarregados, mas em contrapartida verificar-se-á um aumento do tempo de passagem das ordens de fabrico pelo *shop floor*, uma vez que elas passarão mais tempo nas filas de espera. Apesar disso, a consequente diminuição do tempo de permanência na reserva (TPR) poderá conduzir a uma redução do TCT. Para um WIP demasiado elevado verificar-se-á um aumento do TCT, produzido por um longo tempo de espera nas filas, sem que isso corresponda a um aumento de produtividade devido ao facto dos centros de trabalho não terem capacidade para processar todas as encomendas atempadamente. Deste modo, é necessário encontrar um valor para a norma de carga que permita diminuir o WIP até um valor favorável e, consequentemente, o TCT, maximizando a taxa de produção do sistema.

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa de quatro regras de lançamento que ordenam de forma diferente as encomendas que se encontram na reserva e que serão posteriormente libertadas para o *shop floor*. Das quatro regras, três encontram-se referenciadas na literatura, e a restante foi desenvolvida por Martins (2012) e, posteriormente, por Coelho (2013), mas os resultados obtidos não foram conclusivos. A realização deste estudo foi feita recorrendo à simulação, de modo a examinar o efeito que cada uma das regras tem na performance do sistema. O valor da norma de carga é variado ao longo da análise, sendo que, o maior valor utilizado é considerado carga infinita, não existindo qualquer controlo no sistema. As medidas de desempenho a analisar são o TCT, a

percentagem de encomendas atrasadas (concluídas após a sua data de entrega) e o atraso médio das encomendas, em função do TPSF. Se a regra desenvolvida por Martins (2012) e por Coelho (2013) conduzir a resultados significativamente melhores do que aqueles que já se encontram descritos na literatura, para as três restantes regras de lançamento consideradas, este trabalho poderá contribuir para melhorar a produtividade em sistemas produtivos do tipo MTO.

O presente documento está estruturado como se segue. No capítulo 2 é feita uma descrição do PPC por controlo de carga, a sua metodologia, e a forma como é feito o lançamento de encomendas. O modelo de simulação é desenvolvido no capítulo 3, e os resultados e a sua discussão são apresentados nos capítulos 4 e 5, respetivamente. Finalmente, a conclusão deste estudo é feita no capítulo 6.

2. PLANEAMENTO E CONTROLO DA PRODUÇÃO POR CONTROLO DE CARGA

No atual ambiente de produção os mercados são bastante competitivos. Assim, os sistemas PPC são cruciais para ajudar a conhecer a procura e as necessidades dos clientes. Estes têm como objetivos ajudar a conseguir baixos custos de armazenamento, melhorar a capacidade de resposta às mudanças na procura, e facultar a transparência com DD fiáveis (Stevenson *et al.*, 2003).

Em mercados onde a procura tende a ser instável, uma filosofia MTS pode ser demasiado dispendiosa. A solução será produzir apenas depois de a encomenda ser confirmada pelo cliente – empresas MTO. Este tipo de empresas fornece uma grande variedade de produtos, com um elevado grau de customização e de adaptação às necessidades dos clientes, mas em menores quantidades que as empresas MTS. O grande problema aqui é que as rotas no *shop floor* são variáveis, o que implica um maior TCT.

A configuração do tipo *Job Shop* é a mais indicada para o ambiente de produção das empresas MTO. Comporta uma grande diversidade de produtos, com rotas e tempos de produção variados. É caracterizada por um *layout* funcional, onde podem existir diferentes equipamentos, e onde estes são agregados de acordo com a sua função e processo tecnológico, o que dá esta flexibilidade de processamento ao sistema de produção.

2.1. A metodologia WLC

O Controlo de Carga é um dos poucos conceitos de PPC adequados para as empresas MTO (Henrich *et al.*, 2004; Stevenson *et al.*, 2005), e é também particularmente relevante para as PME com recursos financeiros limitados (Land e Gaalman, 2009); sendo que essas empresas desempenham um papel importante nas cadeias de abastecimento (Hendry, 2006).

A metodologia WLC tem como princípio o controlo das filas de espera existentes no *shop floor*, de modo a diminuir o TCT. Isto é possível controlando

simultaneamente a entrada de trabalho no *shop floor* (*input*) e a capacidade de processamento dos centros de trabalho (*output*), através de um método de lançamento de encomendas, que engloba uma decisão de seleção e uma decisão de sequenciamento, e de uma reserva de encomendas. O conceito WLC pode ser representado esquematicamente como se apresenta na Figura 2.1.

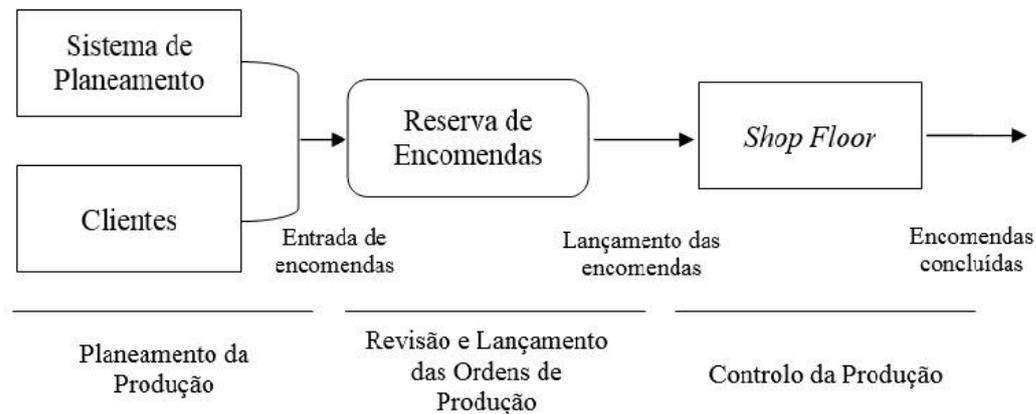


Figura 2.1. Representação esquemática do conceito Controlo de Carga (Silva, 2000).

De acordo com a Figura 2.1, as encomendas confirmadas pelos clientes e/ou geradas pelo sistema de planeamento, aguardam na reserva até serem lançadas para o *shop floor*, onde serão produzidas. Esta reserva não é mais do que um registo informático ou documental dessas encomendas que, periodicamente, sofre a ação de um método de lançamento. Este método ordena as encomendas, de acordo com um determinado critério, e depois seleciona quais as que vão ser libertadas para o *shop floor*. No *shop floor*, as encomendas passam pelos diversos centros de trabalho necessários à sua concretização, e só são concluídas depois de todas as operações terem sido realizadas. O progresso da encomenda é controlado pela prioridade que esta tem em cada centro de trabalho. Contudo, normalmente, opta-se por processar as operações por ordem de chegada (FCFS – *First-Come-First-Served*), o que estabiliza os tempos de ciclo da operação, corrigindo as diferenças de progresso entre as encomendas (Coelho, 2013).

Deste modo, é possível controlar a carga de trabalho existente no *shop floor* e, conseqüentemente, o tamanho das filas de espera dos centros de trabalho. Assim, é necessário definir o limite de carga a impor à fila de espera de cada centro de trabalho. Se a carga que uma determinada operação impõe ao centro de trabalho ultrapassar esse limite, a

encomenda é mantida na reserva até nova avaliação. A reserva permite assim a absorção de flutuações do fluxo de entrada de encomendas (Oosterman *et al.*, 2000). Para além disso, a reserva possibilita ainda a redução do WIP e uma situação de transparência no *shop floor*, com rápidas oportunidades de *feedback*, o que tem grande importância em situações de turbulência numa configuração do tipo *Job Shop* (Oosterman *et al.*, 2000). O tempo que as encomendas passam na reserva permite também o atraso da decisão de produção, o que é vantajoso devido ao facto de uma encomenda poder vir a ser cancelada. Para uma melhor compressão do conceito de tempo utilizado no WLC, segue-se a Figura 2.2.

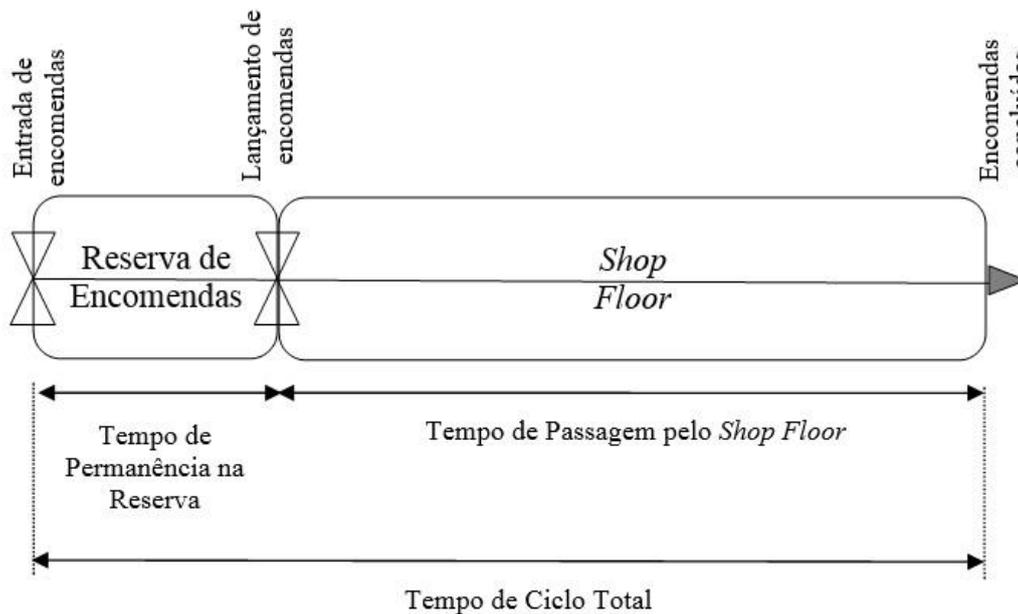


Figura 2.2. Componentes do tempo de ciclo total considerados no conceito WLC (adaptado de Oosterman *et al.*, 2000).

Tendo em conta a Figura 2.2, o tempo de permanência na reserva representa o tempo que a encomenda fica à espera na reserva para ser lançada para o *shop floor*. O tempo de passagem pelo *shop floor* representa o tempo que passa desde que a encomenda é lançada até a sua conclusão. Este tempo pode ser subdividido no tempo de passagem da encomenda por cada centro de trabalho necessário à realização de uma dada operação. O controlo das filas de espera no *shop floor* deverá resultar em estáveis e previsíveis tempos de passagem pelos centros de trabalho (Oosterman *et al.*, 2000). Quanto ao tempo de ciclo total, este representa o somatório do tempo de permanência na reserva com o tempo de passagem pelo *shop floor*. É necessário considerar que durante este tempo podem ocorrer atrasos, como por exemplo, o atraso da matéria-prima e/ou das ferramentas necessárias ao processamento da ordem de produção.

Segundo os autores Shimoyashiro *et al.* (1984), o WIP influencia a taxa de produção do sistema e o TCT da seguinte forma:

- Enquanto o WIP é baixo, a taxa de produção aumenta em proporção ao WIP, mas estabiliza quando o WIP chega a um determinado valor;
- O TCT aumenta em proporção ao WIP.

Portanto, para além das vantagens já referidas, a metodologia WLC, ao possibilitar a redução controlada do WIP, leva à conseqüente redução do TCT sem deterioração da taxa de produção do sistema.

Contudo, a utilização da metodologia WLC onde não é realmente necessária pode aumentar os prazos de entrega devido a complicar uma situação simples, resultando num tempo de agendamento desnecessário (Stevenson *et al.*, 2003).

2.2. Lançamento de Encomendas

Como já foi referido anteriormente, as encomendas que se encontram na reserva sofrem periodicamente a ação de um método de lançamento. Este é um aspeto bastante importante da metodologia WLC, pois determina o momento em que cada encomenda deve entrar no *shop floor*.

O método de lançamento de encomendas pode ser dividido em duas partes: uma decisão de sequenciamento, a qual estabelece a ordem pela qual as encomendas são consideradas para lançamento; e uma decisão de seleção, que determina o critério para escolher qual a encomenda ou encomendas que vão ser libertadas da reserva (Thürer, *et al.*). A decisão de sequenciamento das encomendas pode ser sustentada por uma regra com base no tempo, onde as encomendas começam a ser consideradas para lançamento de acordo com uma medida de urgência; ou então por uma regra com base na carga que a encomenda irá impor aos centros de trabalho. A decisão de seleção tem a ver com a carga das encomendas, isto é, as encomendas apenas são lançadas para o *shop floor* se as normas de carga dos centros de trabalho afetados não forem excedidas.

O momento de lançamento da encomenda pode ser determinante para cumprir a DD. No entanto, pode-se argumentar que o melhor momento para lançar uma encomenda

pode entrar em conflito com as normas de carga previamente determinadas (Oosterman *et al.*, 2000).

2.2.1. Decisão de Sequenciamento

As encomendas que se encontram na reserva são periodicamente ordenadas de acordo com uma determinada regra de lançamento. Essa regra pode ser baseada no tempo ou na carga.

Da literatura identificaram-se duas regras com base no tempo, são elas:

- *Earliest Due Date* (EDD): ordena as encomendas por ordem crescente de data de entrega, isto é, dá prioridade às encomendas com data de entrega mais próxima.
- *Planned Release Date* (PRD): sequencia as encomendas por ordem crescente das suas datas de lançamento planeadas, as quais são obtidas pela equação (2.1).

$$PRD_w = DD_w - \sum_{i=1}^n (TP_{i,w}) - C_w \cdot c \quad (2.1)$$

A data de lançamento planeada da encomenda w (PRD_w) é o resultado da subtração à sua data de entrega (DD_w) do somatório do tempo de processamento que a encomenda w impõe a cada centro de trabalho i ($TP_{i,w}$), e do tempo médio que se espera que a encomenda esteja em filas de espera, sendo C_w o número de centros de trabalho por onde a encomenda w tem de passar até ser concluída. Este tempo é estimado utilizando o fator c , ao qual é atribuído o valor 5, este valor foi também utilizado por Martins, (2012) e por Coelho (2013).

Na literatura é dada mais atenção às regras de lançamento com base no tempo. Contudo, identificou-se a seguinte regra baseada na carga:

- *Release Length* (RL): organiza as encomendas por ordem decrescente da carga total que cada encomenda vai impor ao *shop floor*, a qual é dada pela equação (2.2).

$$RL_w = \sum_{i=1}^n WC_{i,w} \quad (2.2)$$

Onde RL_w representa a carga total imposta pela encomenda w , e $WC_{i,w}$ representa a carga que a encomenda w acrescenta ao centro de trabalho i . O objetivo desta regra é maximizar a carga a enviar para o *shop floor*.

Estas três regras foram testadas neste estudo, e os seus resultados serão apresentados na secção 4.

2.2.2. Decisão de Seleção

Cada encomenda é composta por um determinado número de operações que são realizadas em diferentes postos de trabalho. No momento do lançamento da encomenda para o *shop floor*, cada operação vai contribuir com uma determinada carga para os postos de trabalho que fazem parte da sua rota. A contribuição da carga é feita de acordo com a abordagem de carga corrigida, isto é, o tempo de processamento da operação é dividido pela posição do centro de trabalho na rota das tarefas (Oosterman *et al.*, 2000.). A correção aplicada permite fazer uma estimativa da futura carga direta do centro de trabalho (Oosterman *et al.*, 2000).

Para verificar se uma encomenda pode ou não ser lançada, é comparada a carga atual de cada centro de trabalho com as normas de carga pré-determinadas. A carga atual é o resultado da contribuição referida em cima e da carga que já se encontrava no posto de trabalho. Se a norma de um ou mais centros de trabalho for infringida, a encomenda é retida na reserva e sua contribuição de carga não é contabilizada, passando-se para a encomenda seguinte da sequência. Caso contrário, a encomenda é selecionada para lançamento, e a sua carga é contabilizada em cada centro de trabalho de acordo com a correspondente ordem na sua rota (Thürer, *et al.*). Estes passos são repetidos até que todas as encomendas da reserva tenham sido consideradas para lançamento.

3. MODELO DE SIMULAÇÃO

Como foi referido anteriormente, as encomendas que se encontram na reserva são ordenadas de acordo com uma determinada regra de lançamento para posteriormente serem lançadas para o *shop floor* segundo essa ordem. É então interessante averiguar qual o efeito das regras de lançamento no desempenho do sistema produtivo. Com esse objetivo foi desenvolvido um modelo de simulação.

3.1. Características do Sistema Produtivo

O modelo de simulação representa o *shop floor* de um sistema produtivo com uma configuração do tipo *Job Shop*, mais precisamente um *Pure Job Shop* (PJS). Um PJS é caracterizado por um fluxo de operações sem direção dominante e onde as sequências das rotas são completamente aleatórias (Oosterman *et al.*, 2000). Este modelo é adotado na maioria dos estudos com configurações do tipo *Job Shop*.

O *shop floor* contém seis centros de trabalho, onde cada um deles é um recurso único de capacidade constante. Todos os centros de trabalho têm a mesma probabilidade de serem visitados e, durante o encaminhamento de uma encomenda, um determinado centro de trabalho apenas é necessário uma vez.

Como em estudos anteriores de simulação em WLC (ex.: Land e Gaalman, 1998; Thürer *et al.*, 2012), é assumido também aqui que todas as encomendas são aceites para produção, dando assim entrada na reserva, onde permanecem até serem lançadas para o *shop floor*, não sendo imposto nenhum limite de tempo para a sua permanência. Aquando do lançamento, já é conhecido o número e a sequência das operações necessárias à conclusão de cada encomenda, bem como o tempo de processamento de cada operação. Assume-se também que todos os materiais estão disponíveis para a realização das operações. A regra de sequenciamento das operações nas filas de espera é FCFS.

Na Tabela 3.1, estão resumidas as características do sistema produtivo.

Tabela 3.1. Características do sistema produtivo.

Configuração do <i>shop floor</i>	<i>Pure Job Shop</i>
Número de centros de trabalho	6
Centro de trabalho	Recurso único
Capacidade dos centros de trabalho	Constante ao longo do tempo
Regra de sequenciamento das filas de espera	FCFS

3.2. Características das Encomendas

Para a simulação do sistema de produção foi necessário definir alguns parâmetros relativos às encomendas, foram eles: o número de operações por encomenda, a sequência de operações de cada encomenda, o tempo de processamento de cada operação, o tempo médio entre chegada de encomendas e a data de entrega. Estes parâmetros são de seguida explicados em detalhe.

Cada encomenda é composta por um determinado número de operações, que pode variar uniformemente entre um e seis, e cada operação é realizada num centro de trabalho específico. A sequência das operações necessárias à realização de cada encomenda é aleatória, e cada centro de trabalho apenas é visitado uma vez na rota de trabalho de uma dada encomenda, como já tinha sido referido na secção 3.1.

Para a obtenção dos tempos de processamento de cada operação, autores como Oosterman *et al.* (2000) e Thürer, *et al.* sugerem que a distribuição de 2-Erlang é a que conduz a resultados mais próximos da realidade num *Job Shop*. Contudo, neste estudo, optou-se por utilizar a distribuição exponencial negativa com média 1 e excluir todos os valores obtidos superiores a 5 unidades de tempo. Deste modo, procurou-se evitar que as encomendas ficassem retidas demasiado tempo na reserva por terem tempos de operação muito elevados e violassem à partida as normas de carga das filas nos centros de trabalho.

O tempo médio entre chegadas de encomendas segue uma distribuição exponencial negativa com média 0,7, o que conseqüentemente gera uma taxa de utilização dos centros de trabalho de aproximadamente 79%, como será apresentado na Tabela 4.1.

As datas de entrega das encomendas foram obtidas pela adição de um fator aleatório, obtido por uma distribuição uniforme entre 25 e 45, ao instante de chegada das mesmas. Para simplificação, os tempos de *setup* são desprezados.

Na Tabela 3.2, estão resumidas as características das encomendas. Foram considerados os mesmos parâmetros que foram utilizados no estudo de Martins (2012) e no estudo de Coelho (2013).

Tabela 3.2. Características das encomendas.

N.º de operações por encomenda	Dist. Uniforme [1, 6]
Sequência das operações	Aleatória
Tempo de processamento das operações	Dist. Exp. Neg. truncada, $\mu = 1$, max = 5
Tempo médio entre chegadas	Dist. Exp. Neg., $\mu = 0,7$
Data de Entrega	Somatório do instante de chegada com a ; $a = U\sim[25-45]$
Tempo de Setup	Não considerado

3.3. Método de Lançamento das Encomendas

Depois de darem entrada na reserva, as encomendas sofrem a ação periódica de um método de lançamento, de 5 em 5 unidades de tempo. Como já foi mencionado na secção 2.2, esse método é composto por uma decisão de sequenciamento e uma decisão de seleção.

A decisão de sequenciamento tem o papel de ordenar as encomendas que se encontram na reserva de acordo com uma determinada regra. Neste estudo selecionaram-se três regras de lançamento, referidas na literatura e já mencionadas na secção 2.2.1, são elas: *Earliest Due Date* (EDD), *Planned Release Date* (PRD) e *Release length* (RL). Para além disso, utilizou-se uma regra de otimização (OPT – *Optimization*) que já tinha sido desenvolvida por Martins (2012) e por Coelho (2013), mas sem a obtenção de resultados conclusivos. Na secção 3.3.1 encontra-se uma revisão da referida regra.

Posteriormente à sua ordenação, as encomendas sofrem a ação da decisão de seleção que determina o critério para escolher qual a encomenda ou encomendas que vão ser libertadas da reserva. Este aspeto já foi desenvolvido na secção 2.2.2, contudo, a forma como a contabilização da carga é feita é aprofundada na secção 3.3.2.

3.3.1. Regra de Otimização

Esta regra recorre à programação linear binária, utilizando o Solver do Microsoft Excel para selecionar as encomendas que irão ser lançadas para o *shop floor*. O que se pretende saber é se é benéfico ou não lançar uma determinada encomenda num determinado instante, ou seja, uma decisão do tipo sim ou não, o que é claramente um problema de programação binária.

A literatura sobre WLC (ex. Land, 2006) tem atribuído a decisão de sequenciamento como função do tempo, e a decisão de seleção como função da carga. Contudo, como já havia sido referido por Thüerer, *et al.*, uma regra de lançamento com base na carga pode ser interessante no sequenciamento das encomendas. Assim, a regra de otimização tem como objetivo selecionar as encomendas a lançar, de modo a minimizar a carga livre nos centros de trabalho do *shop floor*, ou seja, minimizar o valor de Z da equação (3.1), que representa a função objetivo deste problema, a qual está sujeita às restrições representadas pelas equações (3.2). Isto significa que esta regra irá promover a maximização do número de encomendas lançadas em cada período, sem ultrapassar a norma imposta aos centros de trabalho do sistema.

$$Z = \sum_{i=1}^6 (x_i - \sum_{j=1}^n w_{i,j} \cdot b_j) \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{i,j} \cdot b_j \leq x_i \quad (3.2)$$

$$b_j = 0 \text{ ou } b_j = 1$$

$$j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, 6$$

Na equação (3.1), x_i representa a carga disponível no centro de trabalho i , $w_{i,j}$ é a carga imposta ao centro de trabalho i pela operação j , e b_j é a variável binária referente à operação j . Note-se que, a carga disponível no centro de trabalho i é obtida tendo em conta a norma de carga.

A equação (3.1) está restringida ao facto de a carga a ser imposta ao centro de trabalho i , pela operação j , ter de ser menor ou igual à carga disponível nesse mesmo centro de trabalho. Quanto à variável b_j , esta apenas pode tomar o valor 0 ou 1, sendo que, se a decisão de lançar a encomenda para o *shop floor* for positiva, a variável b_j toma o valor 1, caso contrário, toma o valor 0. Neste modelo são considerados apenas seis postos de trabalho, i , e cada posto de trabalho pode processar n operações.

Desta forma é conseguida uma combinação ótima das encomendas a lançar, num determinado período, pois a carga nos postos de trabalho é equilibrada.

É de assinalar que, na regra de otimização, não é feita uma distinção entre a decisão de sequenciamento e a decisão de seleção. As encomendas, ao serem seleccionadas de acordo com a minimização da carga disponível nos centros de trabalho do *shop floor*, são imediatamente sequenciadas.

A regra de otimização, ao ser uma regra baseada na carga, é alheia às DD das encomendas, assim como a regra RL.

3.3.2. Contabilização da Carga

A encomenda é lançada para o *shop floor* se a carga que impuser aos centros de trabalho pelos quais tem de passar não exceder a norma de carga previamente definida, caso contrário tem de aguardar na reserva até ao próximo período de lançamento.

A contabilização da carga segue a abordagem da carga corrigida, isto é, a carga é depreciada de acordo com a posição do centro de trabalho na sua rota. Segundo Thürer *et al.* (2010), a abordagem de carga corrigida pode trazer ligeiras melhorias.

As etapas são as seguintes:

1. Inspeccionar qual o valor da carga atual nos diversos centros de trabalho, seguindo a abordagem de carga corrigida.
2. Verificar se a encomenda pode ser lançada e, para isso, é necessário incrementar a carga atual dos referidos centros de trabalho com o valor da

carga corrigida das operações correspondentes da encomenda considerada, não podendo, o valor obtido, exceder a norma de carga para que a encomenda seja lançada.

3. No momento do lançamento da encomenda, incrementar a carga dos centros de trabalho por onde esta irá ter de passar com o valor de carga corrigida imposto pela operação correspondente.

No ponto 1, para além de se considerar a carga das encomendas que estão nas filas de espera dos centros de trabalho, considera-se também a carga das encomendas que estão em produção nesses mesmos centros de trabalho.

3.4. Norma de Carga e Medidas de Desempenho

Para cada uma das quatro regras de lançamento, referidas ao longo deste documento, é necessário determinar valores apropriados para a norma de carga. Deste modo, será possível comparar as regras em diferentes níveis de aperto de carga. Os valores que a norma de carga irá assumir são os seguintes: 20,0; 15,0; 12,5; 10,0 e 7,5 unidades de tempo. O maior valor utilizado de norma de carga – 20,0 – é suficientemente elevado para ser considerado carga infinita, isto porque permite que todas as encomendas sejam aceites e sigam diretamente para o *shop floor*, não sendo aplicado qualquer controlo no sistema. O controlo começa a ser aplicado quando a norma de carga começa a ser mais restrita, ou seja, quando o seu valor começa a diminuir.

As normas de carga devem ser definidas para cada centro de trabalho. Neste estudo, nas quatro regras de lançamento utilizadas, as normas têm o mesmo valor em todos os centros de trabalho.

As medidas de desempenho registadas são o TCT, a percentagem de atraso e o atraso médio, em função do TPSF. A percentagem de atraso representa a percentagem de encomendas que são concluídas após a sua DD. Quanto ao atraso médio, este é a medida do atraso das encomendas. Note-se que, é esperado que o TPSF das encomendas diminua com o aperto da norma de carga (Oosterman *et al.*, 2000). Os resultados correspondentes serão apresentados graficamente e em forma de tabela na secção 4.

Estas medidas têm todo o interesse para o caso em estudo, pois balancear o tempo com o atraso é fundamental, demorar pouco tempo mas ter demasiadas encomendas atrasadas pode não ser compensatório.

3.5. Descrição do Modelo de Simulação desenvolvido

Neste estudo, partiu-se do modelo de simulação inicialmente desenvolvido por Martins (2012) e, posteriormente, por Coelho (2013). Este modelo tinha algumas falhas, nomeadamente no que diz respeito a:

- Cálculo da carga atual das máquinas;
- Regra de lançamento RL;
- Atualização da carga no momento do lançamento.

Estas falhas foram corrigidas de acordo com o que já foi referido na secção 3.3.2.

Nos pontos seguintes desta secção, o modelo de simulação desenvolvido irá ser explicado integralmente para uma melhor compreensão do método de lançamento de encomendas e do conceito de reserva.

3.5.1. Metodologia e Ferramentas utilizadas

Para representar o caso em estudo, recorreu-se a um *software* de simulação, o SIMUL8, e ao Microsoft Excel, que nos permitiu desenvolver um sistema de apoio à decisão (SAD). O termo SAD foi definido por Finlay (1994), como “um sistema computacional que auxilia o processo de tomada de decisão”, e é exatamente como é utilizado neste estudo. A metodologia utilizada está apresentada na Figura 3.1.

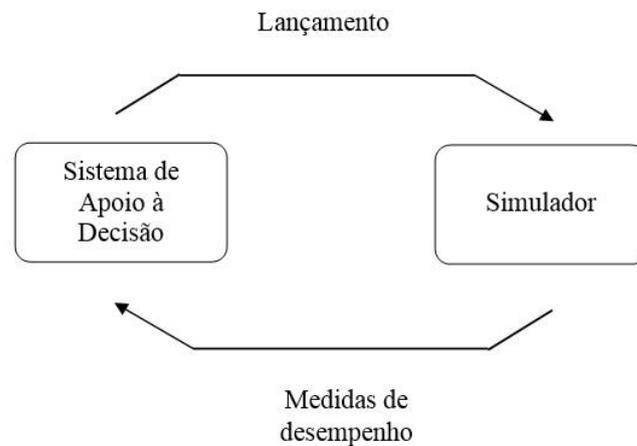


Figura 3.1. Metodologia utilizada (Martins, 2012).

O SAD permite a automatização do método de lançamento de encomendas, isto é, é através deste sistema que as encomendas são geradas e que, posteriormente, são lançadas para o *shop floor* de acordo com a regra de lançamento escolhida. É o SAD que toma as decisões sobre o lançamento das encomendas. O Simulador funciona como o *shop floor*, as encomendas são processadas e os dados respetivos ao seu processamento são enviados para o SAD para depois se fazer a sua análise.

Para a obtenção do SAD, foi desenvolvida uma macro no Microsoft Excel, e utilizada a linguagem de programação Visual Basic for Applications (VBA), que permite interagir com o SIMUL8 e utilizar um conjunto de folhas de cálculo para armazenar informação. Esta interação entre o Microsoft Excel e o Simulador está automatizada. Assim, como o modelo em estudo obedece a um lançamento periódico, em cada período, ocorrem as seguintes etapas:

1. Verificação do estado atual do *shop floor*.
2. Geração de novas encomendas.
3. Aplicação da regra de lançamento.
4. Lançamento das encomendas para o *shop floor*.
5. Processamento das encomendas.
6. Envio da informação sobre as medidas de desempenho.

Os pontos 1 a 4 são realizados pelo SAD, e os pontos 5 e 6 pelo Simulador.

Para que a interação entre o SAD e o Simulador seja possível, o ficheiro Microsoft Excel tem uma folha de controlo com interruptores 0/1, que permite saber a cada

aplicação se pode iniciar o seu processo. É ainda necessário colocar as aplicações num modo de espera, isto é, enquanto uma aplicação está a ser computadorizada a outra está em espera até que o valor do interruptor seja alterado. Assim, no Simul8, programam-se *loops* de leitura do interruptor, até que o valor seja alterado para 1 pelo Microsoft Excel. Quando isto acontece, as rotinas VBA são terminadas e reprogramadas para iniciar passado 1 segundo ou quando o SIMUL8 alterar o valor do interruptor. Esta reprogramação da rotina cria 1 segundo de pseudo-latência do Microsoft Excel em que a folha não está a ser usada e pode ser usado pelo SIMUL8.

3.5.2. Parâmetros da Simulação

Para a simulação do modelo, foi essencial definir alguns parâmetros como, o tempo de simulação, que corresponde à duração de cada corrida, o tempo de *warm up*, o intervalo entre lançamentos (já referido na secção 3.3) e o número de corridas a efetuar. Na Tabela 3.3 encontra-se o valor atribuído a cada um dos parâmetros mencionados.

Tabela 3.3. Parâmetros utilizados na simulação.

Tempo de simulação	3000 unidades de tempo
<i>Warm up</i>	1000 unidades de tempo
Intervalo entre lançamentos	5 unidades de tempo
N.º de ciclos	600
N.º de corridas	30

O tempo de simulação é 3000 unidades de tempo e o tempo de *warm up* é 1/3 do tempo de simulação – 1000 unidades de tempo, esta relação foi também considerada por Oosterman *et al.* (2000). Note-se que, o número de ciclos é dado pela divisão do tempo de simulação pelo intervalo entre o lançamento de encomendas, isto é, o período. Quanto ao número de corridas – 30, este corresponde ao número de vezes que foi simulado o caso em estudo, mantendo uma determinada regra de lançamento e uma determinada norma de carga. Sendo que, foram utilizadas quatro regras de lançamento e cinco normas de carga

diferentes. No estudo feito por Oosterman *et al.* (2000), foram feitas 50 corridas de simulação, contudo 30 corridas já permite obter resultados fiáveis.

3.5.3. Programação do Modelo de Simulação em VBA

O código está dividido em três módulos. O primeiro módulo corresponde à rotina principal e é onde se encontra estruturado o método de lançamento de encomendas. Esta está ainda dividida em três fases:

1. Rotina de iniciação: prepara o sistema para iniciar.
2. Rotina cíclica: vai sendo repetida até completar o número de ciclos.
3. Rotina final: reunião de todos os dados.

O segundo módulo é uma rotina auxiliar que vai sendo chamada ao longo da rotina principal, pois contém funções que auxiliam o lançamento das encomendas. No terceiro módulo encontram-se funções básicas que auxiliam todo o processo e, devido à sua simplicidade, não se justifica a sua descrição neste documento.

Na Figura 3.2 encontra-se o fluxograma das rotinas que serão descritas de seguida.

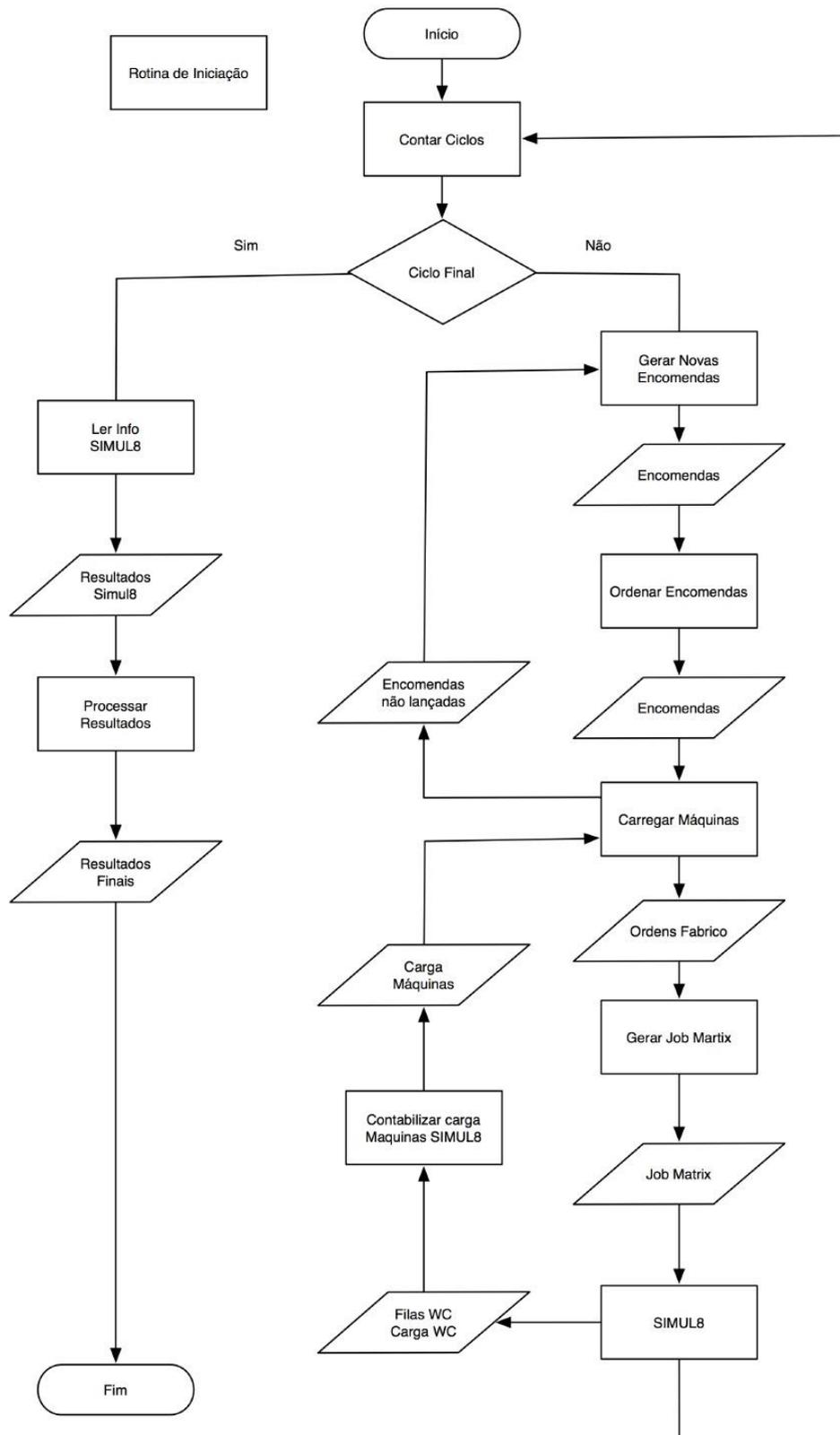


Figura 3.2. Fluxograma das rotinas programadas em VBA (Coelho, 2013).

3.5.3.1. Rotina de Iniciação

Na parte inicial da rotina principal são atribuídos valores às variáveis e são iniciados os contadores. É também ativado o SIMUL8 e aberto o ficheiro de simulação para ser executado durante o tempo de simulação definido.

3.5.3.2. Rotina Cíclica

Esta rotina é executada até se cumprir o tempo de simulação que, neste estudo, corresponde a 600 ciclos. Está programada para iniciar de segundo a segundo, até que o SIMUL8 indique que está no tempo correto. Quando isso acontece, em cada ciclo, são executadas as seguintes sub-rotinas: calcular a carga das máquinas no *shop floor*; gerar novas encomendas; ordenar as encomendas; regra de otimização (quando for solicitada); carregar as máquinas; e gerar a *Job Matrix*. Apresenta-se de seguida uma descrição das mesmas.

3.5.3.2.1. Calcular a Carga das Máquinas no Shop Floor

O SIMUL8 regista numa folha de cálculo o estado atual do *shop floor*, isto é, as encomendas que se encontram em fila de espera e em processamento nos centros de trabalho. Posteriormente, é feita a contabilização da carga total de cada centro de trabalho de acordo com a abordagem de carga corrigida. É contabilizada aqui a carga que cada encomenda vai impor aos postos de trabalho por onde ainda irá ter de passar, ou seja, os postos de trabalho que fazem parte da sua rota de trabalho. Este aspeto não tinha sido considerado por Martins (2012) nem por Coelho (2013).

3.5.3.2.2. Gerar Novas Encomendas

A função desta sub-rotina é gerar um novo lote de encomendas durante 5 unidades de tempo. É atribuído um número de referência único a cada encomenda e é definido o número de centros de trabalho por onde esta irá ter de passar, assim como a sua sequência. Para além disso, é determinada também a carga que cada encomenda irá impor aos centros de trabalho ao longo da sua rota e a sua data de entrega. Estas atribuições respeitam os parâmetros definidos na secção 3.2. São ainda colocadas informações

adicionais em cada encomenda como a carga total, a carga corrigida total e o número de operações por encomenda.

3.5.3.2.3. Ordenar as Encomendas

Nesta etapa, as encomendas encontram-se numa folha de cálculo, que representa a reserva, e são ordenadas de acordo com a regra de lançamento escolhida. O critério de ordenação de cada regra é o seguinte:

- EDD: as encomendas são ordenadas por ordem crescente dos valores que se encontram na coluna com as datas de entrega.
- PRD: são calculadas as datas de lançamento planeadas, numa nova coluna, e as encomendas são ordenadas por ordem crescente dos valores obtidos.
- RL: as encomendas são ordenadas por ordem decrescente dos valores que se encontram na coluna da carga total.

A regra de otimização é uma exceção, uma vez que tem uma rotina própria, descrita na secção 3.5.3.2.4.

Foi feita aqui uma alteração ao trabalho desenvolvido por Coelho (2013), uma vez que, a ordenação que estava a ser feita na regra RL era por ordem crescente dos valores que se encontram na coluna da carga total, o que está errado. O objetivo desta regra é lançar primeiro para o *shop floor* as encomendas que impõe maior carga total, logo a ordenação deve ser por ordem decrescente.

3.5.3.2.4. Regra de Otimização

Esta sub-rotina faz uso do Microsoft Excel Solver para seleccionar as encomendas a lançar para o *shop floor*, de modo a minimizar a carga livre nos centros de trabalho. A descrição desta regra de lançamento foi feita na secção 3.3.1.

As encomendas que forem escolhidas são lançadas para o *shop floor* tendo em conta o valor da norma de carga, as restantes permanecem na reserva até nova avaliação no período seguinte. Nesta sub-rotina, as máquinas são de imediato carregadas com a carga correspondente das encomendas escolhidas e de acordo com a abordagem de carga corrigida.

3.5.3.2.5. Carregar as Máquinas

Esta sub-rotina é utilizada pelas regras de lançamento EDD, PRD e RL, uma vez que, na regra OPT as máquinas são carregadas na sub-rotina de otimização.

O objetivo aqui é aplicar a decisão de seleção, respeitando a ordem das encomendas definida na sub-rotina de ordenação. Para isso, é adicionada a carga corrigida de cada operação da encomenda, à carga que se encontra nos centros de trabalho correspondentes. Se o valor da carga resultante não exceder o valor da norma de carga em nenhum dos centros de trabalho, a encomenda é lançada para o *shop floor* e é atualizado o valor da carga dos centros de trabalho correspondentes. Esta atualização é feita de acordo com a abordagem de carga corrigida, o que não estava a ser considerado por Coelho (2013). Obtém-se assim um lote de encomendas que segue para o *shop floor* e outro que permanece na reserva até nova avaliação.

3.5.3.2.6. Gerar a Job Matrix

Aqui, as encomendas lançadas para o *shop floor* são colocadas num formato equivalente ao da *Job Matrix* utilizada no SIMUL8. A *Job Matrix* contém informação sobre a referência da encomenda, a sequência dos centros de trabalho pela qual a referência vai passar e a carga correspondente.

Como toda a informação necessária ao simulador está preparada, este é ativado, dando-se assim início à simulação, onde vão ser recolhidos todos os resultados necessários.

3.5.3.2.7. Verificação do número de ciclos

Enquanto o número de ciclos total não é atingido, é reiniciada a rotina cíclica, de segundo a segundo, até haver uma resposta por parte do SIMUL8. Quando o tempo de corrida termina, segue-se para a rotina final.

3.5.3.3. Rotina Final

Esta é a última etapa da rotina principal. É aqui que os resultados da simulação são organizados e armazenados nas folhas do Microsoft Excel.

Para isso, esta rotina é reiniciada de segundo a segundo, até que o SIMUL8 ative o interruptor 0/1, que indica que terminou a escrita dos resultados na folha “Resultados”. Esses resultados englobam a referência da encomenda, o instante de entrada no simulador, o instante de saída do simulador, bem como a percentagem de ocupação de cada um dos seis centros de trabalho que se encontram no *shop floor*. Depois de obtidos estes resultados, o simulador é desativado.

Os resultados conseguidos com a simulação são depois integrados na folha “masterEncomendas”, que contém toda a informação relativa a cada encomenda. Posteriormente são realizados os cálculos estatísticos necessários, e cria-se uma nova folha com toda a informação referente à respetiva corrida.

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos com o modelo de simulação previamente descrito. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos em todas as corridas efetuadas. A Figura 4.1, a Figura 4.2 e a Figura 4.3 representam a relação do tempo no sistema – TCT, da percentagem de encomendas atrasadas e do atraso médio de encomendas, respetivamente, com o tempo de percurso – TPSF. Cada ponto nas curvas decorre da média dos resultados das 30 corridas de simulação realizadas para uma determinada norma de carga e regra de lançamento.

Conforme referido anteriormente, os parâmetros utilizados neste projeto foram escolhidos tendo em conta os trabalhos de Martins (2012) e Coelho (2013). Numa primeira análise aos resultados acima referidos, verificou-se que estes apresentavam alguns problemas: (1) a percentagem de tarefas atrasadas é claramente superior àquela que se encontra em trabalhos de outros autores (ex.: Thüerer, *et al.*), e (2) o comportamento das regras de lançamento não era o esperado. Seria expectável que as regras EDD e PRD e RL e OPT tivessem comportamentos semelhantes entre si, uma vez que partilham o mesmo princípio (tempo e carga, respetivamente), o que não se verifica.

Procurou-se verificar o que teria corrido “mal”, tendo-se concluído que os parâmetros escolhidos para o sistema não foram os mais adequados. Utilizou-se, para a definição da data de entrega a regra: data atual + $U\sim[25-45]$, quando na maioria da literatura sobre o WLC a regra é: data atual + $U\sim[30-60]$. Note-se que, quando o tempo de processamento é de 5 unidades de tempo, com os valores escolhidos, uma encomenda que tenha de passar pelos 6 postos de trabalho está à partida condenada ao atraso quando é recebida, independentemente da regra de lançamento a definir. Por outro lado verificou-se que, com os parâmetros escolhidos, a taxa de ocupação dos equipamentos ronda os 79%, quando os valores encontrados na literatura apontam para taxas de ocupação de 85%-90%, o que denota uma escolha errada do intervalo entre a chegada de encomendas. Esta baixa taxa de ocupação poderá justificar o comportamento das regras, pois sabe-se que o WLC é particularmente útil para sistemas sobrecarregados, tendo menor interesse para sistemas menos carregados.

Assim, decidiu-se obter novos resultados, alterando os parâmetros relativos às características das encomendas para os que se encontram na Tabela 4.2, exceto no que diz respeito à distribuição considerada para a obtenção do tempo de processamento das operações, onde se manteve uma distribuição exponencial negativa, de média 1, mas onde se excluem agora todos os valores superiores a 4 unidades de tempo. Foram efetuadas apenas 20 corridas de simulação, o que conduz a resultados não tão fiáveis, contudo já vai ser possível verificar se as modificações feitas são benéficas. Os resultados obtidos em todas as corridas realizadas encontram-se na Tabela 4.3. A Figura 4.4, a Figura 4.5 e a Figura 4.6 representam a relação do tempo no sistema, da percentagem de atraso de encomendas e do atraso médio de encomendas, respetivamente, com o tempo de percurso.

Tabela 4.1. Resultados obtidos com o modelo de simulação utilizando os parâmetros da Tabela 3.2.

Regras de Lançamento	Norma de Carga														
	7,5			10,0			12,5			15,0			20,0		
	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT
PRD	10,2	13,0	23,2	4,0	14,1	18,1	3,0	15,0	18,0	2,7	15,6	18,3	2,5	16,1	18,6
EDD	8,4	12,9	21,3	3,4	13,6	17,0	3,0	14,8	17,8	2,6	15,7	18,3	2,5	16,3	18,8
RL	9,6	13,1	22,7	4,2	14,3	18,5	3,1	15,0	18,1	2,7	15,6	18,3	2,5	16,0	18,5
OPT	5,7	12,6	18,3	3,2	13,7	16,9	2,8	14,8	17,6	2,6	15,6	18,2	2,5	16,2	18,7
	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.
PRD	18,1	12,8	78,0	9,2	7,2	78,4	9,0	7,2	78,8	9,8	7,8	79,5	10,4	8,2	79,1
EDD	15,9	10,0	77,7	6,9	6,1	77,2	8,5	6,9	78,9	9,8	7,6	79,2	10,9	8,4	79,7
RL	13,8	20,1	78,3	9,5	9,5	78,5	9,1	7,9	78,5	9,3	8,0	78,5	9,5	8,2	79,1
OPT	8,7	13,1	77,4	6,6	6,9	78,0	7,7	6,7	78,6	9,2	7,3	79,4	10,8	7,9	79,7

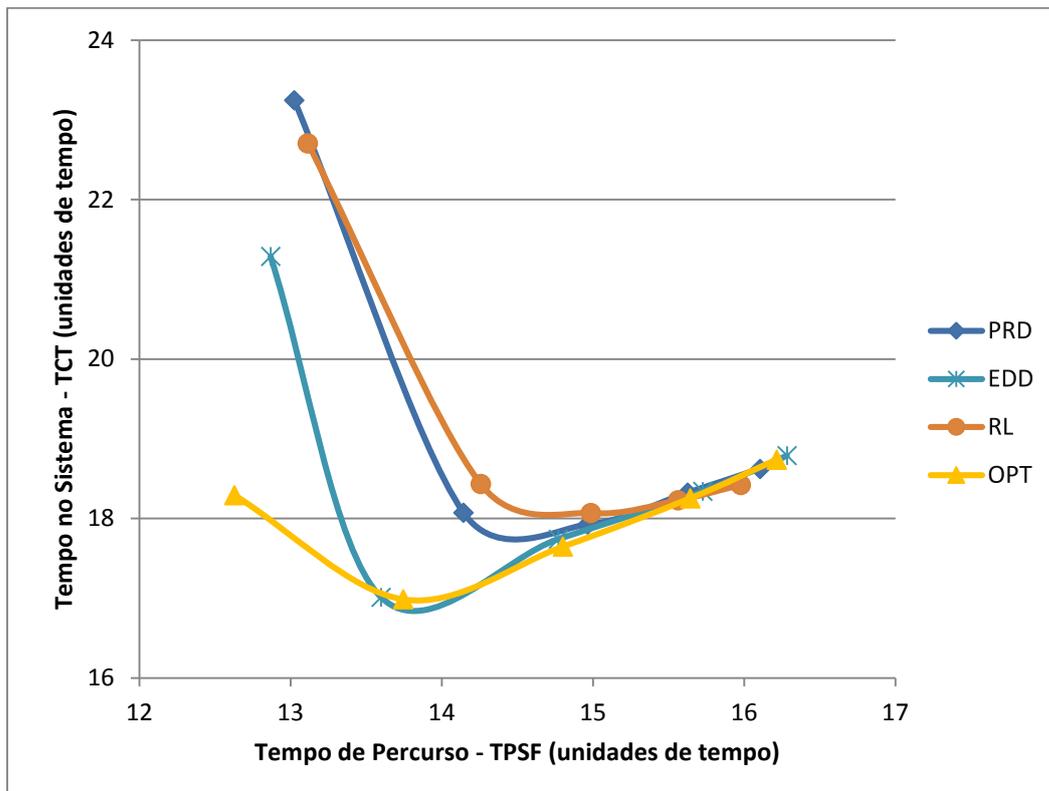


Figura 4.1. Curvas de desempenho: Relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso.

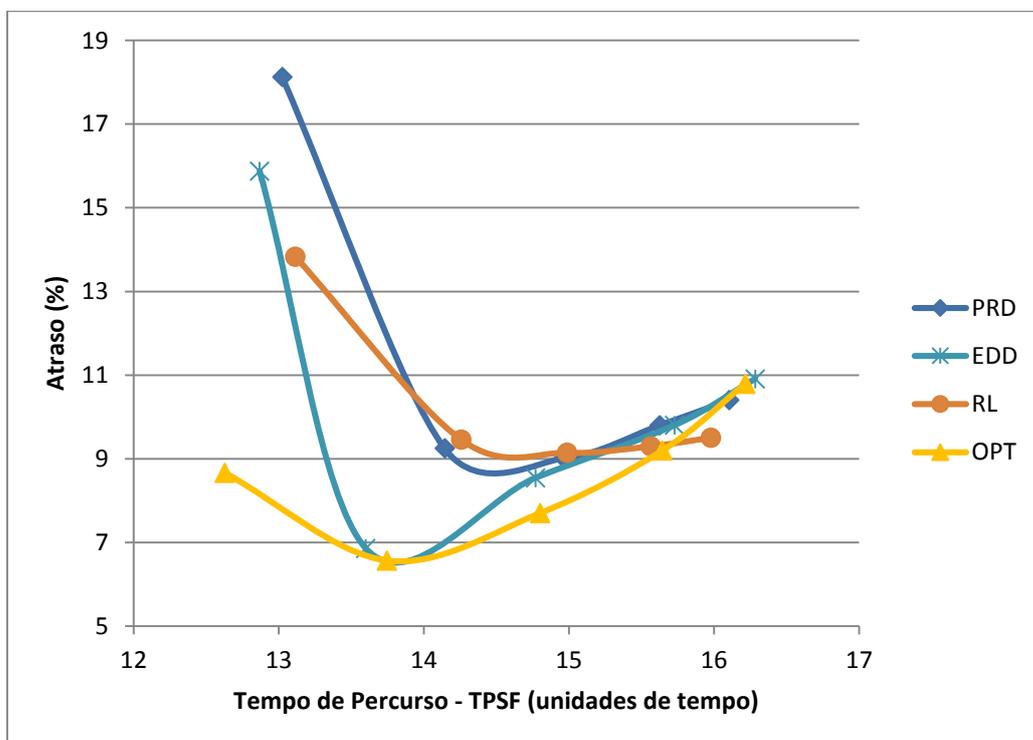


Figura 4.2. Curvas de desempenho: Relação entre a percentagem de atraso e o tempo de percurso.

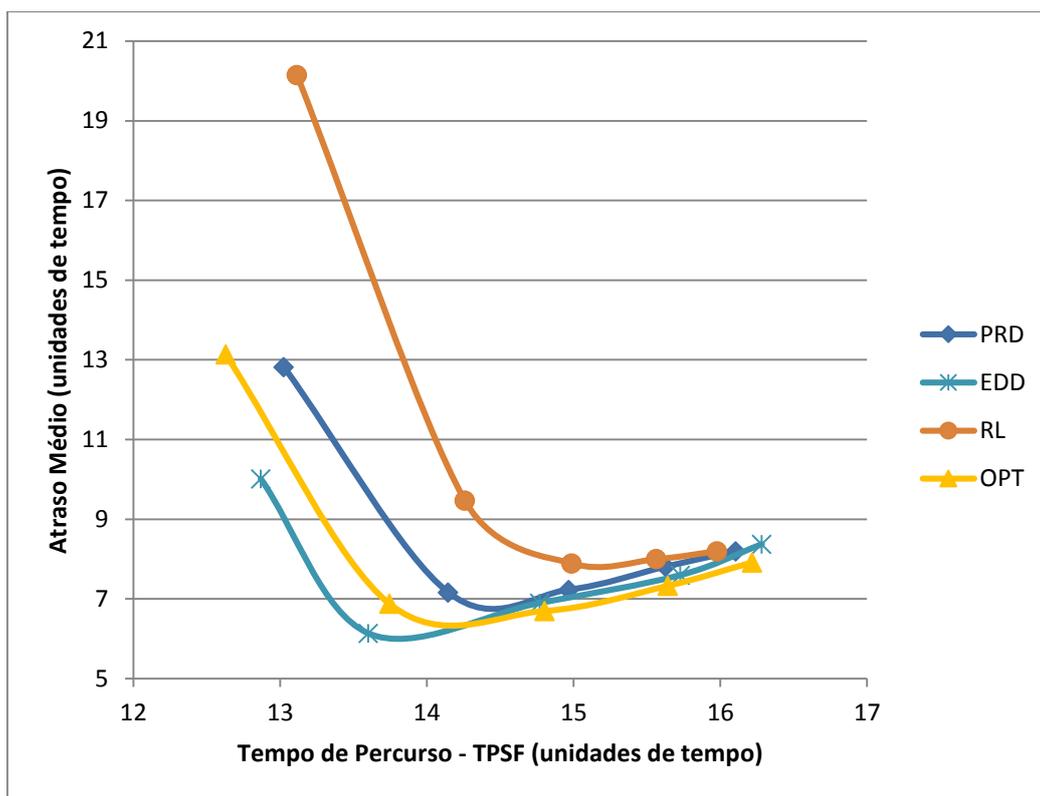


Figura 4.3. Curvas de desempenho: Relação entre o atraso médio e o tempo de percurso.

Tabela 4.2. Características das encomendas utilizadas no estudo de Thürer, *et al.*.

Tempo de processamento das operações	Dist. de 2-Erlang, truncada, $\mu = 1$, max = 4
Tempo médio entre chegadas	Dist. Exp. Neg., $\mu = 0,648$
Data de Entrega	Somatório do instante de chegada com a ; $a = U\sim[30-60]$

Tabela 4.3. Resultados obtidos com o modelo de simulação utilizando os parâmetros da Tabela 4.2.

Regras de Lançamento	Norma de Carga														
	7,5			10,0			12,5			15,0			20,0		
	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT	Média TPR	Média TPSF	Média TCT
PRD	10,3	13,5	23,8	4,3	14,8	19,1	2,8	15,5	18,3	2,7	16,5	19,2	2,5	16,7	19,2
EDD	12,5	13,3	25,8	4,2	14,5	18,7	3,2	15,7	18,9	2,6	17,2	19,8	2,6	17,6	20,2
RL	13,3	13,5	26,8	4,4	15,2	19,6	3,0	16,0	19,0	2,7	17,5	20,2	2,5	17,9	20,4
OPT	5,2	13,1	18,3	3,6	14,4	18,0	3,0	16,1	19,1	2,7	16,7	19,4	2,5	17,3	19,8
	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.	% Atraso	Atraso Médio	% Ocup.
PRD	11,5	11,5	81,2	4,4	6,4	81,7	3,5	5,8	81,8	4,5	6,9	82,4	4,8	7,0	81,6
EDD	15,4	13,2	80,7	4,1	6,4	81,4	4,3	6,7	82,7	5,5	8,0	82,2	6,0	8,5	82,5
RL	11,4	31,4	81,1	4,8	10,9	81,8	4,5	8,0	82,6	5,9	8,3	82,4	6,1	8,6	82,6
OPT	3,7	15,8	81,1	3,1	9,4	81,0	4,4	8,0	82,1	4,9	7,7	82,4	5,6	7,5	82,2

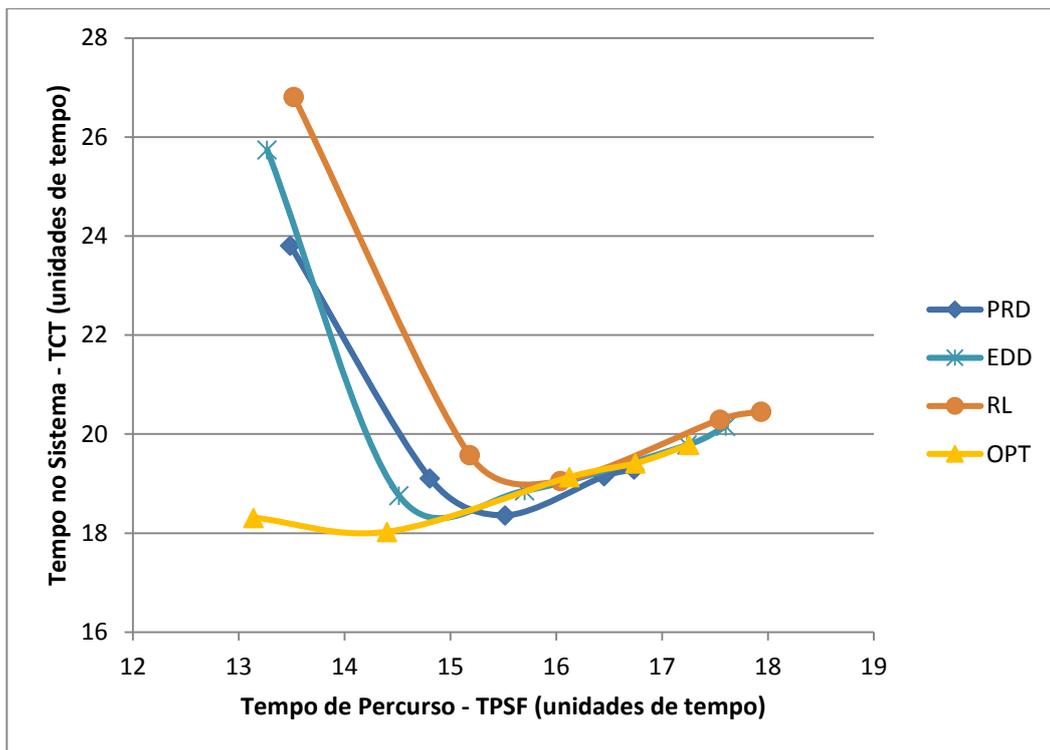


Figura 4.4. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre o tempo no sistema e o tempo de percurso.

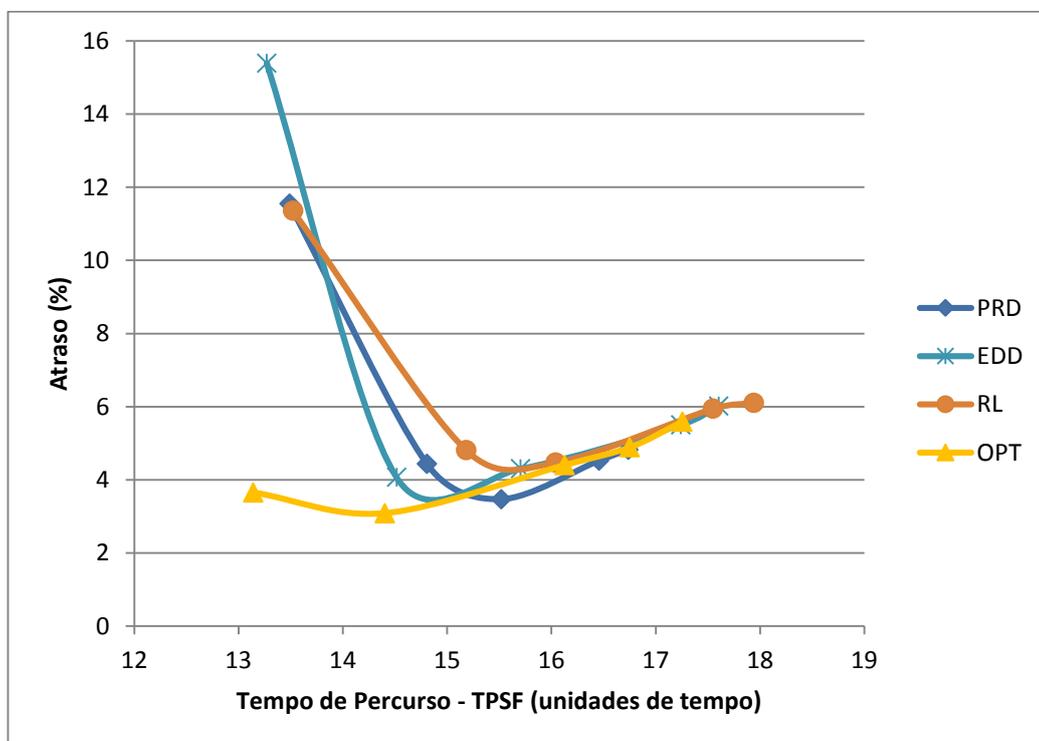


Figura 4.5. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre a percentagem de atraso e o tempo de percurso.

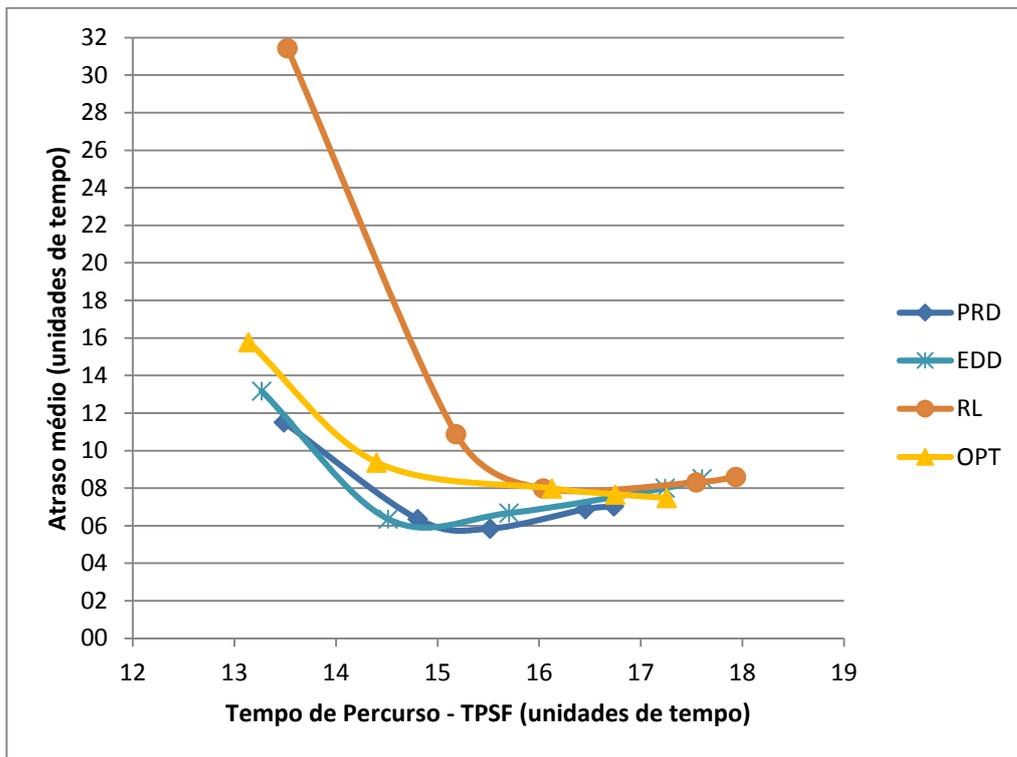


Figura 4.6. Curvas de desempenho (obtidas com a alteração das características das encomendas): Relação entre o atraso médio e o tempo de percurso.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O controlo começa a ser aplicado no sistema à medida que a norma de carga vai diminuindo, o que é verificado pelos valores obtidos para o TPR demonstrados na Tabela 4.1. Isto é, à medida que o limite de carga começa a ser mais apertado, as encomendas permanecem, em média, mais tempo na reserva. E, conseqüentemente, como o TPSF diminui, é possível obter um menor TCT. Contudo, quando o valor da norma de carga começa a ser demasiado apertado, o TPR aumenta em demasia, não compensando a diminuição do TPSF, o que aumenta o TCT, tornando-se este ainda maior do que quando não havia controlo no sistema – norma de carga 20,0. No caso da norma de carga 7,5, chega mesmo a não ser possível lançar todas as encomendas geradas no mesmo período de lançamento, visto que, os lançamentos são feitos de 5 em 5 unidades de tempo, e o TPR, em média, ultrapassa esse valor em todas as regras de lançamento consideradas.

O gráfico da Figura 4.1 descreve o comportamento referido anteriormente. Para além disso, através da sua análise, verifica-se que as regras que são baseadas no tempo – EDD e PRD – e as regras que são baseadas na carga – RL e OPT – não têm um comportamento semelhante entre si, o que não seria de esperar, uma vez que, as regras baseadas no tempo têm ambas em atenção a DD da encomenda, e as regras baseadas na carga têm como objetivo maximizar a carga a enviar para o *shop floor*, sendo alheias à DD. Contudo, o que de facto acontece é que a regra PRD tem um comportamento semelhante à regra de lançamento RL, e a regra EDD aproxima-se mais dos resultados obtidos pela regra OPT. O comportamento distinto da regra OPT e da regra RL é explicado pelo facto de a regra OPT equilibrar a carga entre os postos de trabalho, o que não acontece na regra RL. Observa-se também que, as regras de lançamento EDD e OPT permitem um maior aperto no que diz respeito à norma de carga, isto é, para estas, o valor mínimo do TCT é obtido quando a norma de carga é 10,0, mas para as regras PRD e RL, o valor mínimo do TCT é conseguido quando a norma de carga tem o valor de 12,5. Porém, a norma de carga 7,5 não é compensatória para nenhuma das quatro regras de lançamento.

Na Tabela 5.1 encontra-se o diferencial obtido com a aplicação do controlo no sistema para o caso em que o TCT é mínimo. Da análise da Tabela 5.1, depreende-se que,

para além do TCT alcançado ser menor nas regras EDD e OPT, o diferencial obtido é maior, isto é, a aplicação do controlo no sistema é mais notória nestas regras. Pois, nas regras EDD e OPT conseguiu-se uma diminuição do TCT de 1,8 unidades de tempo, enquanto que, nas regras PRD e RL apenas se conseguiu uma diminuição de 0,6 e 0,4 unidades de tempo, respetivamente. Note-se contudo que, apesar de o TCT mínimo da regra EDD e OPT apenas diferir em 0,1 unidades de tempo, o menor valor foi obtido com a regra OPT. E, sabendo que, estratégias com melhor performance baixam o tempo no sistema para um determinado tempo de percurso no *shop floor* (Fernandes e Carmo-Silva, 2011), podemos concluir que a regra OPT é a que aqui apresenta um melhor desempenho.

Tabela 5.1. Diferencial obtido com a aplicação do controlo no sistema para o caso em que o TCT é mínimo.

Regra de Lançamento	TCT			Diferencial
	Norma de Carga			
	10,0	12,5	20	
PRD	18,1	18,0	18,6	0,6
EDD	17,0	17,8	18,8	1,8
RL	18,5	18,1	18,5	0,4
OPT	16,9	17,6	18,7	1,8

O gráfico da Figura 4.2 permite-nos avaliar a relação entre a percentagem de encomendas atrasadas e o TPSF. Novamente aqui, as regras baseadas no tempo – PRD e EDD – e as regras baseadas na carga – RL e OPT – não têm comportamentos similares entre si, como era de esperar. Fazendo uma análise individual a cada regra constata-se o seguinte:

- Na regra RL, a menor percentagem de encomendas atrasadas – 9,1% – foi adquirida com norma de carga de 12,5. Esta é uma regra “cega” à DD das encomendas, como tal, era previsível que, dentro das quatro regras, uma das maiores percentagens de encomendas atrasadas fosse aqui obtida.

- Na regra PRD, o menor valor da percentagem de atraso – 9,0% – foi conseguido para a norma de carga 12,5. Contudo, esta regra devia apresentar melhores resultados que as restantes, uma vez que dá prioridade às encomendas com data de lançamento planeada mais próxima.
- Na regra de lançamento EDD, a menor percentagem de atraso – 6,9% – foi obtida para a norma de carga 10,0. Já era expectável que a percentagem de encomendas atrasadas, aqui obtida, fosse das mais baixas, devido a esta regra sequenciar as encomendas pela DD mais próxima.
- A regra OPT, apesar de ser uma regra baseada na carga, consegue ter um desempenho melhor do que as regras baseadas no tempo, alcançando uma percentagem de encomendas atrasadas mínima de 6,6%, quando a norma de carga é de 10,0.

Quando a norma de carga é 7,5, a percentagem de encomendas atrasadas dispara para valores elevados, exceto na regra de otimização, onde apesar de haver uma deterioração da percentagem de atraso da norma de carga 10,0 para a norma de carga 7,5, são permitidas normas de carga mais apertadas que as restantes regras.

Na Figura 4.3, numa primeira fase, observa-se um comportamento quase linear de todas as regras de lançamento consideradas, começando depois a aumentar o atraso médio a partir da norma de carga 10,0, para as regras PRD e EDD, e a partir da norma de carga 12,5 para as regras RL e OPT. O comportamento descrito pelas regras de lançamento, neste caso, é mais previsível, uma vez que, a regra RL, sendo “cega” à DD, é a que representa um pior desempenho, e as regras PRD e EDD, descrevem um comportamento mais similar entre si, sendo o menor atraso médio – 6,1 unidades de tempo – alcançado pela regra EDD (com norma de carga 10,0). A regra OPT tem aqui um comportamento melhor do que a regra PRD, o que não era de todo expectável.

Note-se que, tanto na Figura 4.1, como na Figura 4.2, como na Figura 4.3, quando não existe controlo no sistema, isto é, quando a norma de carga tem o valor 20,0, os resultados obtidos nas regras de lançamento consideradas são muito similares. Este facto já era expectável pois, como o valor é suficientemente elevado, não é imposta

restrição à carga a enviar para o *shop floor*, sendo as encomendas apenas sequenciadas de formas diferentes na reserva.

Na Tabela 4.1 encontra-se a percentagem de ocupação média dos postos de trabalho para cada uma das normas de carga e regras de lançamento consideradas. Esta é da ordem dos 79%, sendo bastante similar em todas as situações consideradas. Contudo, a taxa de utilização média dos *Job Shop* é cerca de 85%-90%.

Para ter uma perceção da fiabilidade dos resultados obtidos neste estudo, é necessário compará-los com resultados já descritos na literatura. A comparação vai ser feita com o estudo de Thüerer, *et al.*, onde existe uma relação da percentagem de encomendas atrasas e do atraso médio, com o TPSF, para as regras PRD e EDD. Os resultados obtidos no presente estudo diferem dos resultados obtidos no estudo realizado por Thüerer, *et al.* no que diz respeito ao comportamento das regras de lançamento PRD e EDD, que é bastante similar; e na percentagem de atraso e no atraso médio, que são significativamente menores do que o que foi aqui obtido. Para além disso, no estudo de Thüerer, *et al.*, a regra PRD tem um comportamento ligeiramente melhor do que a regra EDD, em termos da percentagem de atraso, o que no presente estudo não se verifica. Contudo, no estudo de Thüerer, *et al.*, quando se utilizam regras com base na carga, estas permitem reduzir significativamente a percentagem de encomendas atrasadas em relação às regras com base no tempo, o que se verifica neste estudo relativamente à regra de otimização. Esta regra permite um melhor desempenho do sistema do que a regra RL porque não pretende apenas maximizar a carga a enviar para o *shop floor*, como também equilibrar a carga entre postos de trabalho.

As diferenças verificadas, tanto a nível do comportamento das regras de lançamento, como da percentagem de encomendas atrasadas, podem ter a ver com os parâmetros utilizados em cada caso, como já tinha sido explicado na secção 4. No presente estudo consideraram-se as características das encomendas que se encontram na Tabela 3.2. No estudo realizado por Thüerer, *et al.*, as características das encomendas diferem das aqui utilizadas nos parâmetros relativos ao tempo de processamento das operações, ao tempo médio entre chegadas e às datas de entrega. As atribuições feitas por Thüerer, *et al.* a estes parâmetros encontram-se na Tabela 4.2. Para além disso, no estudo de Thüerer, *et al.*, o sequenciamento das filas de espera é feito de acordo com a DD da operação, isto é, do conjunto de operações que se encontra na fila de um posto de trabalho, as operações com

DD mais próxima são processadas primeiro. Isto permite obter um atraso menor do que o que é obtido no presente estudo, onde o sequenciamento nas filas de espera é feito por FCFS.

Os parâmetros utilizados no presente estudo foram também utilizados por Martins (2012) e Coelho (2013), como já foi referido na secção 3.2. Estes parâmetros pareciam ser adequados, contudo, com as alterações feitas ao modelo de simulação, estes parâmetros passaram a não ser os mais apropriados. Deste modo, foi realizada uma nova simulação, alterando os parâmetros relativos às características das encomendas para os correspondentes que se encontram na Tabela 4.2, exceto no que diz respeito à distribuição considerada para a obtenção do tempo de processamento das operações, onde se manteve uma distribuição exponencial negativa, de média 1, mas onde se excluem agora todos os valores superiores a 4 unidades de tempo. A discussão dos novos resultados é feita de seguida.

Da análise dos gráficos da Figura 4.4, da Figura 4.5 e da Figura 4.6, depreende-se que as regras de lançamento PRD e EDD apresentam agora um comportamento similar. Para além disso, a regra PRD alcança um menor TCT e uma menor percentagem de atraso do que o que é conseguido pela regra de lançamento EDD, como acontece no estudo realizado por Thürer, *et al.*. Relativamente à regra de otimização, esta apresenta um melhor desempenho em termos do TCT e da percentagem de atraso, quando comparada com as restantes regras de lançamento. Isto deve-se a esta regra conseguir, mais do que as outras, diminuir o TPR em situações de aperto da norma de carga. Este facto já tinha sido constatado antes da alteração das características das encomendas. Para além disso, esta regra tem também a capacidade de selecionar um lote ótimo de encomendas a lançar para o *shop floor*, de modo a equilibrar a carga entre postos de trabalho. No que diz respeito ao atraso médio, as regras PRD e EDD apresentam um melhor desempenho do que a regra OPT. Isto porque, na regra de otimização, há um conjunto de encomendas que não fazem sucessivamente parte das encomendas ótimas a lançar para o *shop floor*, o que aumenta o seu tempo de permanência na reserva, fazendo com que se atrasem. Porém, esse atraso médio é apenas 2,2 unidades de tempo superior (na norma de carga 12,5) ao que se obtém na regra de lançamento PRD. A regra de lançamento RL continua a ser a que apresenta um pior desempenho a todos os níveis.

Um dos objetivos a atingir também com alteração das características encomendas era reduzir a percentagem de atraso. Este aspeto foi conseguido, uma vez que, esta diminuiu em mais de 50% em todas as regras consideradas, à exceção da regra EDD, onde passou de 6,9% para 4,1%. Note-se que, esta analogia é feita para os pontos onde a percentagem de atraso é mínima. Com a alteração das características das encomendas foi ainda possível, como era pretendido, aumentar a taxa de ocupação dos postos de trabalho. Esta passou de aproximadamente 79% para 82%, como se demonstra na Tabela 4.3. Porém, os 85% a 90% pretendidos não foram atingidos. Foram iniciadas corridas com um valor inferior para o tempo entre chegada de encomendas, mas estas não foram realizadas a tempo dos resultados serem apresentados neste documento.

Fazendo uma análise comparativa dos resultados apresentados na Tabela 4.1 com os resultados expostos na Tabela 4.3, depreende-se que a alteração das características das encomendas foi benéfica, conseguindo-se, para além de um melhor desempenho das regras de lançamento, resultados mais similares aos obtidos por Thürer, *et al.*. Deste modo, é possível afirmar que a regra de otimização permite um melhor desempenho do sistema produtivo, quando comparada com as restantes regras analisadas neste documento, tanto a nível do TCT como da percentagem de encomendas atrasadas.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo perceber qual o impacto das regras de lançamento de encomendas no desempenho de um sistema produtivo do tipo *Job Shop*. Para isso, foi feita uma análise comparativa de quatro regras que ordenam de forma diferente as encomendas que se encontram na reserva e que serão posteriormente libertadas para o *shop floor*. Das quatro regras, três encontram-se referenciadas na literatura – EDD, PRD e RL – e a restante – regra de otimização – foi desenvolvida por Martins (2012) e, posteriormente, por Coelho (2013), mas os resultados alcançados não foram conclusivos.

Neste estudo, os resultados obtidos mostram que as regras de lançamento têm um impacto direto no desempenho do sistema produtivo, tanto em termos do tempo que uma encomenda permanece no sistema, como em termos do atraso da encomenda em relação à sua data de entrega. Verificou-se que a regra de otimização permite desempenhos melhores que as restantes regras analisadas em termos de TCT e percentagem de tarefas atrasadas, sendo, no entanto, pior no que diz respeito ao atraso médio por ser “cega” ao parâmetro data de entrega. Apesar disso, é notório que uma regra de otimização adequada poderá conduzir a melhorias face às regras até agora apresentadas na literatura. Nesse sentido, será pertinente no futuro procurar alterar a função objetivo definida para a regra de otimização de modo a que nela se integre, não só a otimização do equilíbrio da carga entre postos de trabalho, mas também se considere a data de entrega das encomendas no processo de seleção das ordens de fabrico a lançar para o *shop floor*.

As limitações deste trabalho tiveram a ver com o facto de o *software* utilizado ser moroso, o que não permitiu recolher tantos resultados como era necessário, não sendo possível fazer uma análise mais concludente. Assim, propõe-se também que sejam feitas mais corridas, utilizando um valor inferior para o tempo entre chegada de encomendas, o que permitirá aumentar a taxa de ocupação dos postos de trabalho para os 85%-90% previstos na literatura, sendo possível, assim, fazer uma análise mais fiável na distinção das referidas regras de lançamento, o que poderá contribuir para a aplicação prática do conceito WLC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coelho, P. (2013), “Análise comparativa de regras de lançamento utilizadas no WLC”, Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Fernandes, N.O. e Carmo-Silva, S. (2011), "Workload control under continuous order release", *Intern. Journal of Production Economics*, 131(1), 257–262.
- Finlay, P. N. (1994), “Introducing decision support system”, Oxford, UK Cambridge, Mass., NCC Blackwell: Blackwell Publishers.
- Hendry, L. C. e 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. (2006), “Workload control: for effective integration of SMEs in the supply chain”, *Proceedings of the International Workshop on Successful strategies in Supply Chain Management*, Hong Kong, 17–23.
- Henrich, P., Land, M.J., Gaalman, G. (2004). “Exploring applicability of the workload control concept”, *International Journal of Production Economics*, 90, 187–198.
- Land, M. (2006), “Parameters and sensitivity in workload control”, *International Journal of Production Economics*, 104(2), 625-638.
- Land, M. J. e Gaalman, G. J C. (1998), “The performance of workload control concepts in job shops: improving the release method”, *International Journal of Production Economics*, 56-57, 347-364.
- Land, M.J. e Gaalman, G.J.C. (2009), “Production planning and control in SMEs: time for change. *Production Planning and Control*”, 20 (7), 548–558.
- Martins, M. (2012), “Planeamento de Produção por Controlo de Carga: Análise comparativa de regras de lançamento”, Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Oosterman, B., Land, Martin e Gaalman, G. (2000), “The influence of shop characteristics on workload control”, *Int. J. Production Economics*, 68, 107-119
- Shimoyashiro, S., Isoda, K. e Awane, H. (1984), “Input scheduling and load balance control for a job shop”, *Int. J. Prod. Res.*, 22(4), 597-605.
- Silva, C. (2000), “Um sistema de apoio à decisão para o planeamento da produção recorrendo ao conceito de controlo de carga (SYCLOPP)”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Stalk, G. e Hout, T. M. (1990), “Competing against time: how time based completion is reshaping global markets”, The Free Press, Macmillan Inc.
- Stevenson, M., Hendry e L. C., Kingsman, B. G. (2003), “A review of new and established production planning and control (PPC) methods and their applicability to make to order (MTO) companies”, Proceedings of the Euroma-POMS conference, Como, Italy, June 2003, 739-747.
- Stevenson, M., Hendry, L. C. e 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.
- Thürer, M., Land, M., Stevenson, M., Fredendall, L. e Godinho Filho, M., “Concerning workload control and order release: the pre-shop sequencing decision”, Working Paper.
- Thürer, M., Silva, C. e Stevenson, M. (2010), “Workload control release mechanisms: from practice back to theory building”, International Journal of Production Reserch, 49(4), 1151-1171.
- Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M. e Fredendall, L. (2012), “Workload control (WLC) and order release: A lean solution for make-to-order companies”, Production & Operations Management, (forthcoming).
- Zäpfel, G. e Missbauer, H. (1993), “New concepts for production planning and control”, European Journal of Operational Research, 67, 297-320.