



Revisão e Comparação dos Modelos de Planeamento da Gestão da Produção

ÂNGELA FRANCISCA RIBEIRO TEIXEIRA

julho de 2025

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Revisão e Comparação dos Modelos de Planeamento da Gestão da Produção

Ângela Francisca Ribeiro Teixeira

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Julho, 2025

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial.

Candidato: Ângela Francisca Ribeiro Teixeira, N.º 1222384,
1222384@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Professor Doutor Paulo Ávila, psa@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Professor Doutor Nuno O. Fernandes, nogf@ipcb.pt

ISEP INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA DO PORTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Julho, 2025

*Aos meus pais, Armando e Maria, que me ensinaram que não existem barreiras
para quem sonha.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais, Armando Teixeira e Maria José Soares Ribeiro, por todo o trabalho árduo, por terem abdicado de tanto para me colocarem onde estou hoje, mas acima de tudo por me encorajarem e motivarem a ser uma pessoa melhor. Esta dissertação também é resultado de todo o vosso esforço. Um obrigada nunca chegará para agradecer tudo o que já fizeram por mim por isso, fica a promessa que a minha ambição nunca terá fim.

Aos meus orientadores, Doutor Paulo Ávila e Doutor Nuno Fernandes, por toda a orientação e apoio na realização da presente dissertação. Gostaria de expressar o meu especial agradecimento por toda a paciência e atenção mas também por contribuirem para o meu desenvolvimento, tanto a nível pessoal como académico.

Quero também agradecer à Carla, à Sofia, à Ines e à Lara, pessoas que me apoiaram nos melhores e nos piores momentos, que estiveram sempre lá para dar uma palavra amiga e que me ouviram quando mais precisei.

Ao ISEP por me ter acolhido e se ter tornado a minha segunda casa ao longo destes anos, por todos os recursos disponibilizados e pelas oportunidades de aprendizagem proporcionadas.

Resumo

Atualmente as empresas deparam-se com o problema de como aumentar a eficiência do sistema produtivo enquanto mitigam desperdícios e perdas. Para isso torna-se essencial definir qual o modelo de planejamento e controle da produção a adotar para cada tipo de contexto produtivo uma vez que estes assumem um papel fundamental no equilíbrio da capacidade produtiva com a procura do mercado.

Nesse sentido, a presente dissertação tem como objetivo apresentar o estudo exaustivo dos modelos de planejamento e controle da produção com o intuito de responder às seguintes questões: Quais os modelos de planejamento e controle da produção referenciados na literatura e o seu funcionamento? Os modelos de planejamento e controle da produção têm diferentes enquadramentos no sistema produtivo? Que combinações de modelos (modelos mistos) já foram estudadas (implementadas ou simuladas) e comparadas?

Após a revisão de literatura verificou-se que, os modelos de planejamento e controle da produção mais estudados estão divididos segundo as suas abordagens, sendo considerados convencionais (*push* ou *pull*), como é o caso do MRP/MRP II, Modelos de Reposição de Stock, Kanban, CONWIP, DBR/OPT, ou híbridos, isto é, DDMRP, POLCA, WLC e COBACABANA, que serão analisados em detalhe.

Tendo em conta esta análise, propôs-se uma *framework* aplicada aos modelos estudados e seguindo dimensões de classificação definidas com o intuito de auxiliar na comparação e na escolha adequada do modelo tendo em conta o contexto produtivo em causa e as suas necessidades.

Assim, após o estudo dos diversos modelos foram identificadas as combinações de modelos que já tivessem sido implementadas, a partir de simulações, casos de estudo ou casos reais não documentados, como é o caso do *Synchro* MRP, Kanban com CONWIP (*Hybrid* Kanban/CONWIP), DBR/OPT com MRP, COBACABANA com POLCA e o DDMRP com o CONWIP, analisando as vantagens que resultam de cada combinação.

Palavras-Chave: Planejamento da produção, controle da produção, abordagem *push*, abordagem *pull*, modelos mistos, *framework*, eficiência.

Abstract

Companies are currently faced with the problem of how to increase the efficiency of the production system while mitigating waste and losses. To this end, it is essential to define the production planning and control model to be adopted for each type of production context, since they play a fundamental role in balancing production capacity with market demand.

With this in mind, the aim of this dissertation is to present an exhaustive study of production planning and control models in order to answer the following questions: Which production planning and control models are referenced in the literature and how do they work? Do production planning and control models have different frameworks in the production system? What combinations of models (mixed models) have already been studied (implemented or simulated) and compared?

After reviewing the literature, it was found that the most studied production planning and control models are divided according to their approaches, being considered conventional (push or pull), such as MRP/MRP II, Stock Replenishment Models, Kanban, CONWIP, DBR/OPT, or hybrid, i.e. DDMRP, POLCA, WLC and COBACABANA, which will be analyzed in detail.

Taking this analysis into account, a framework was proposed, applied to the models studied and following defined classification dimensions in order to help with the comparison and the appropriate choice of model, taking into account the production context in question and its needs.

Thus, after studying the various models, combinations of models that had already been implemented were identified, based on simulations, case studies or undocumented real cases, such as Synchro MRP, Kanban with CONWIP (Hybrid Kanban/-CONWIP), DBR/OPT with MRP, COBACABANA with POLCA and DDMRP with CONWIP, analyzing the advantages that result from each combination.

Keywords: Production planning, production control, push approach, pull approach, mixed models, framework, efficiency.

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	1
1.1.1 Objetivos	2
1.1.2 Metodologia de Investigação	2
1.2 Organização da Dissertação	3
2 Modelos Convencionais (<i>Push</i> ou <i>Pull</i>) de Planeamento e Controlo da Produção	5
2.1 MRP/MRP II	12
2.2 Modelos de Reposição de Stock	18
2.2.1 Modelos de Revisão Contínua	19
2.2.2 Modelos de Revisão Periódica	22
2.3 PPCP com JIT	26
2.3.1 JIT com abordagem Kanban	26
2.3.2 JIT com abordagem CONWIP	30
2.3.3 DBR/OPT	34
3 Modelos Híbridos de Planeamento e Controlo da Produção	39
3.1 DDMRP	43
3.2 POLCA	47
3.3 WLC	52
3.4 COBACABANA	56
3.5 Outros Modelos Não Classificados com Designação Própria	61
4 Proposta de uma <i>Framework</i> Aplicada aos Sistemas Analisados	63
4.1 Introdução	63
4.2 Dimensões de Classificação	63
4.2.1 Tipo de Gatilho (<i>Trigger</i>) usado para iniciar a produção	64

4.2.2	Geração de Ordens de Produção	64
4.2.3	Lançamento das Ordens na Produção (<i>Input Control</i>)	65
4.2.4	Despacho/Priorização das Ordens no Espaço Fabril	66
4.2.5	Foco no controlo (Pontos de controlo)	67
4.2.6	Tipo de Revisão	67
4.2.7	Integração com Sistemas de Informação	68
4.2.8	Flexibilidade e Facilidade no Reajuste do Planeamento	68
4.2.9	Tipologia de produção	69
4.2.10	<i>Framework</i> aplicada aos sistemas analisados	69
5	<i>Insights</i> para a Prática Industrial decorrentes da Combinação de Modelos	81
5.1	Revisão de literatura	84
5.1.1	<i>Synchro</i> MRP	84
5.1.2	Modelos Mistos sem Designação Própria	86
5.2	Discussão dos Resultados da Revisão Sistemática da Literatura como Geração/Identificação de <i>Insights</i> para a Prática Industrial	90
6	Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro	97

Lista de Figuras

2.1	Modelos Convencionais (<i>Push</i> ou <i>Pull</i>) de Planeamento e Controlo da Produção.	6
2.2	Análise sistemática referente aos modelos convencionais.	7
2.3	Fases do PPCP afetadas pelo MRP (Ávila et al. (2022)).	17
2.4	Fases de abastecimento de um Modelo de Revisão Contínua (Gonçalves (2006)).	20
2.5	Fases de abastecimento de um Modelo de Revisão Periódica (Gonçalves (2006)).	23
2.6	Funcionamento de um sistema Kanban (Spearman e Zazanis (1992)).	28
2.7	Fases do PPCP afetadas pelo JIT com Kanban (Ávila et al. (2022)).	30
2.8	Processo produtivo do sistema CONWIP (Jaegler et al. (2018)). . .	31
2.9	Fases do PPCP afetadas pelo JIT com CONWIP (Ávila et al. (2022)).	33
2.10	Técnica DBR/OPT (Josefsson (2014)).	35
2.11	Fases de um PPCP segundo DBR/OPT (Ávila et al. (2022)).	38
3.1	Modelos Híbridos (<i>Push</i> e <i>Pull</i>) de Planeamento e Controlo da Produção.	40
3.2	Análise sistemática referente aos modelos híbridos.	41
3.3	Fases de um PPCP segundo DDMRP (Ávila et al. (2022)).	47
3.4	Funcionamento do POLCA (Thürer et al. (2017)).	49
3.5	Fases de um PPCP segundo POLCA (Ávila et al. (2022)).	51
3.6	Fases de um PPCP segundo WLC (Ávila et al. (2022)).	56
3.7	Representação do <i>pre-shop pool</i> (Land (2009)).	57
3.8	Fluxo de cartões num sistema COBACABANA (Thürer et al. (2015)).	58
3.9	Fases de um PPCP segundo COBACABANA (Ávila et al. (2022)). .	60
5.1	Resultados da <i>string</i> para os modelos mistos.	83

Lista de Tabelas

2.1	Análise comparativa dos Modelos de Revisão Contínua com os Modelos de Revisão Periódica.	25
3.1	Análise comparativa do COBACABANA com o WLC.	59
4.1	<i>Framework</i> proposto para a classificação dos modelos.	80
5.1	Síntese bibliográfica dos casos de estudo ou simulação referente aos modelos mistos.	91
5.2	Síntese bibliográfica de estudos comparativos entre modelos.	93

Lista de Acrónimos

ATO	<i>Assembly to Order</i>
BOM	<i>Bill Of Materials</i>
COBACABANA	<i>Control of Balance by Card-Based Navigation</i>
CONWIP	<i>CONstant Work In Process</i>
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
DDMRP	<i>Demand-Driven MRP</i>
EDD	<i>Earliest Due Date</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ETO	<i>Engineering to Order</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FISFS	<i>First In System, First Served</i>
GFS	<i>Generic Flow Shop</i>
GPOLCA	<i>Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
LIFO	<i>Last In, First Out</i>
LPT	<i>Longest Processing Date</i>
LUMS Approach	<i>Lancaster University Management School Approach</i>
MPS	<i>Master Production Schedule</i>
MRP	<i>Material Requirements Planning</i>
MRPII	<i>Manufacturing Resource Planning</i>
MST	<i>Minimum Slack Time</i>
MTO	<i>Make to Order</i>

MTS	<i>Make to Stock</i>
OPT	<i>Optimized Production Technology</i>
PAP	Planeamento Agregado da Produção
PCC	Planeamento da Capacidade Crítica
PDP	Planeamento Diretor da Produção
PE	Planeamento Estratégico
PNOFC	Planeamento das Necessidades em Ordens de Fabrico e Compras
POLCA	<i>Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i>
PPCP	Planeamento, Programação e Controlo da Produção
QRM	<i>Quick Response Manufacturing</i>
ROP	<i>Reorder Point</i>
RRC	Recursos Restritivos de Capacidade
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>
TFV	<i>Transformation – Flow – Value</i>
TOC	<i>Teoria das Restrições</i>
TOY	<i>Top Of Yellow</i>
WIP	<i>Work In Process</i>
WLC	<i>Workload Control</i>

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o tema da dissertação com foco na relevância dos modelos de planejamento e controle da produção em ambiente industrial. A seguir, será apresentada, estruturadamente, a contextualização e definição do problema, os objetivos que levaram à sua investigação e a metodologia adotada de forma a orientar o leitor do trabalho desenvolvido.

1.1 Definição do Problema

Com a crescente complexidade dos processos produtivos e a necessidade em oferecer respostas eficazes aos clientes tendo em conta as oscilações do mercado, torna-se imprescindível realizar o planejamento e controle da produção dos espaços fabris de forma adequada.

Com o decorrer dos anos, tem-se verificado uma evolução significativa dos modelos produtivos, impulsionada, principalmente, pelos avanços tecnológicos, pela exigência dos clientes em relação à qualidade e personalização dos produtos e pelo cumprimento dos prazos de entrega dos mesmos. Posto isto, o planejamento e controle da produção tem desempenhado um papel fundamental na gestão dos recursos, na definição de prioridades produtivas e no equilíbrio entre a procura e a capacidade produtiva.

Porém, as empresas têm enfrentado diversos obstáculos, nomeadamente, flutuações na procura, redução dos ciclos de vida dos produtos, constante pressão para redução de custos e a integração com sistemas de informação. Tudo isto leva a uma

tomada de decisão cada vez mais complexa sendo necessário recorrer a ferramentas e modelos que apoiem o planeamento e o controlo.

Assim, a adoção adequada de modelos de planeamento e controlo da produção na empresa contribuirá para a mesma atingir os seus objetivos operacionais enquanto reduz desperdícios. Para que isto aconteça, torna-se fundamental compreender o funcionamento de cada modelo de forma a aplicá-lo, eficazmente, conforme as necessidades de cada espaço fabril o que nem sempre é um processo simples.

1.1.1 Objetivos

A presente dissertação teve como objetivo principal a análise detalhada dos modelos de planeamento e controlo da produção mais adotados pelas empresas de forma a identificar quais se adequariam melhor aos diferentes ambientes industriais. Assim, pretende-se promover uma compreensão aprofundada de cada modelo.

O estudo na presente dissertação visa oferecer uma contribuição de quais critérios a serem considerados na tomada de decisão, de qual modelo a empresa deverá adotar tendo em conta o seu contexto produtivo e como implementá-lo para aumentar o seu desempenho produtivo.

Desta forma, procurou-se responder às seguintes questões:

- Quais os modelos de planeamento e controlo da produção referenciados na literatura e o seu funcionamento?
- Os modelos de planeamento e controlo da produção têm diferentes enquadramentos no sistema produtivo?
- Que combinações de modelos (modelos mistos) já foram estudadas (implementadas ou simuladas) e comparadas?

Foi ainda desenvolvida uma *framework* de forma a apoiar a comparação e seleção do modelo de planeamento e controlo mais adequado a cada contexto produtivo.

1.1.2 Metodologia de Investigação

A metodologia de investigação seguida baseou-se na revisão sistemática da literatura de forma a identificar, analisar e condensar todos os estudos referentes aos modelos de Planeamento, Programação e Controlo da Produção (PPCP), e tornar a presente dissertação mais sólida e fiável tendo em conta os estudos apresentados na literatura. Foram aplicados critérios de inclusão e de exclusão, também foram definidas palavras-chave numa base de dados específica para assegurar o rigor técnico e científico da investigação.

1.2 Organização da Dissertação

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos estruturados com o objetivo de garantir a fluidez e compreensão dos temas abordados.

Assim, o capítulo da introdução apresenta o tema bem como a definição do problema, os objetivos da dissertação e a relevância do tema tendo em conta o paradigma industrial atual.

Segue-se o segundo capítulo, revisão de literatura de forma a identificar os modelos convencionais de planeamento e controlo da produção mais estudados pelos autores seguidos de uma explicação, detalhada, de cada um na perspetiva de cada autor que os desenvolveu, as implicações que cada modelo afeta nas diversas fases do planeamento e controlo da produção e ainda vantagens e desvantagens dos mesmos.

No terceiro capítulo são analisados os modelos híbridos de planeamento e controlo da produção seguindo a mesma lógica do capítulo anterior.

No quarto capítulo é apresentada uma proposta de *framework* aplicada aos modelos estudados nos capítulos anteriores de forma a apoiar na tomada de decisão sobre qual modelo as empresas devem adotar tendo em conta as dimensões de classificação definidas.

No quinto capítulo realizou-se uma revisão de literatura sobre as combinação de modelos existentes a partir de simulações, casos de estudo e casos reais não documentados bem como os seus *insights*.

No último capítulo são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos Convencionais (*Push* ou *Pull*) de Planeamento e Controlo da Produção

Consideram-se modelos convencionais (*push* ou *pull*) de planeamento e controlo da produção os modelos que utilizem, de forma independente e isolada, abordagens *push* e *pull*, como é o caso do *Material Requirements Planning* (MRP)/ *Manufacturing Resource Planning* (MRPII), Modelos de Reposição de Stock, *Just In Time* (JIT) com abordagem Kanban, JIT com abordagem *CONstant Work In Process* (CONWIP) e *Drum-Buffer-Rope* (DBR)/ *Optimized Production Technology* (OPT) (Figura 2.1), modelos que serão estudados, em detalhe, ao longo do presente capítulo.

Estes modelos podem seguir uma abordagem *pull*, isto é, as ordens só são lançadas para o espaço fabril se a procura real assim o justificar, ou uma abordagem *push*, onde as ordens são lançadas tendo em conta previsões, sem considerar o estado atual do sistema.

Será, ainda, efetuada uma análise das implicações nas diferentes fases do PPCP, comparativamente ao PPCP segundo MRP seguidos de exemplos da sua implementação no espaço fabril e, por fim, serão apontadas vantagens e desvantagens do uso de cada modelo em contexto industrial.

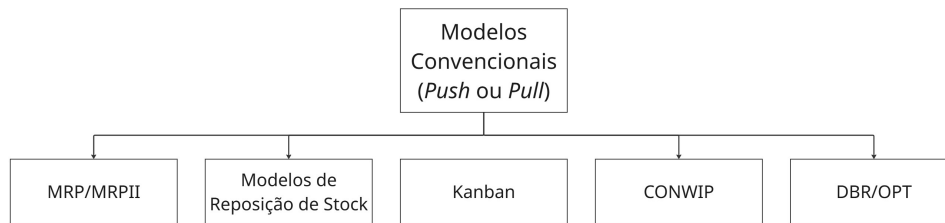


Figura 2.1: Modelos Convencionais (*Push* ou *Pull*) de Planeamento e Controlo da Produção.

Com o objetivo de compreender o trabalho científico atual sobre os modelos convencionais abordados na literatura, foi realizada uma pesquisa bibliográfica. Este processo permitiu explorar os modelos mais referenciados e as abordagens adotadas pelos autores em trabalhos anteriores e identificar lacunas da própria literatura, servindo de base para o enquadramento teórico da presente dissertação.

A análise da literatura envolve uma pesquisa exaustiva de artigos científicos e atas de conferências relacionados com o tema, com o objetivo de identificar os diferentes modelos convencionais adotados no espaço fabril, perceber os critérios adotados na tomada de decisão da sua seleção e analisar o seu comportamento no fluxo produtivo.

O estudo com recurso à base de dados *b-on* serviu para encontrar artigos científicos, presentes em revistas científicas e em atas de conferência, que se enquadrassem com o tema. A sua seleção deu-se devido ao facto desta base de dados disponibilizar uma vasta oferta de publicações, reconhecidas internacionalmente, assegurando uma maior fiabilidade nas fontes utilizadas.

De forma a alinhar a pesquisa com o tema da investigação, definiram-se as seguintes palavras-chave: *Production planning*, *Production control*, *Manufacturing planning*, *Manufacturing control*, *Models*, *Frameworks*, *Control systems*, *Methodologies*, *Review*, *Survey*, *Overview*.

Em seguida, procedeu-se à elaboração de uma *string* com recurso aos operadores *AND* e *OR*, com o objetivo de restringir a pesquisa a artigos que contivessem todos os termos especificados ou que abrangessem expressões com o mesmo conceito.

Foi ainda aplicado um filtro para serem selecionados artigos presentes em revistas científicas (analisadas pelos pares) e atas de conferências, com acesso ao texto integral via editor e inglês como linguagem pretendida. Para além disso, optou-se por uma filtragem pelo campo *TI* (título) a alguns termos definidos na *string*, para os mesmos surgirem no título dos artigos de forma a obter uma correspondência mais focada com o tema e ainda foi definido um intervalo de 20 anos, ou seja, revistas científicas e conferências desde 01/01/2000. Resultando, assim, na seguinte *string*: *TI* ("production planning"OR "production control"OR "manufacturing planning"OR "manufacturing control") AND *TI* ("models"OR "frameworks"OR "control systems"OR "methodologies") AND ("review"OR "survey"OR "overview").

Como apresentado na Figura 2.2, dos 96 artigos obtidos a partir da pesquisa: 12 são duplicados, 13 não foram publicados em revistas científicas ou em conferências, 1 está em linguagem que não o inglês (espanhol), 2 não utilizam as palavras-chave definidas, 8 não têm acesso total disponível ao artigo e 48 não possuem qualquer relação com o tema quando analisados de forma completa. Por estes motivos, foram excluídos da análise resultando na inclusão de 12 artigos.

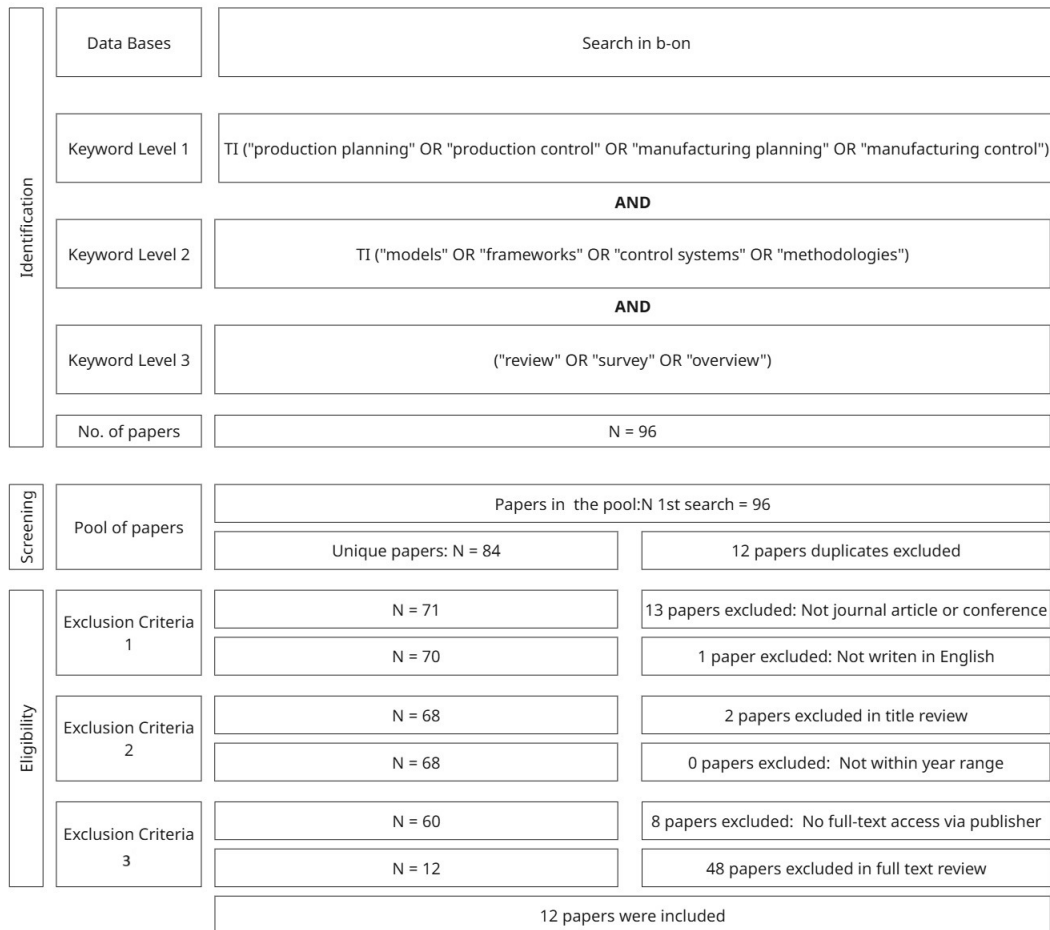


Figura 2.2: Análise sistemática referente aos modelos convencionais.

Zijm (2000) refere que o desenvolvimento do MRP originou uma revolução no planeamento e controlo da produção no final dos anos 60 e início dos anos 70. Ao contrário dos métodos que iniciavam a produção quando o stock descia abaixo de um determinado nível, o MRP inicia a produção a partir de que a empresa quer fabricar e entregar ao cliente. Posto isto, não existiam stocks de segurança e qualquer oscilação no sistema teria de ser contornada com uma definição mais adequada dos *lead times* sendo, por isso, uma limitação da implementação do MRP. Posto isto, os autores definem o MRP como um modelo que trata o mundo industrial de forma determinística, pois quaisquer tipos de incertezas devem ser combatidas com o aumento dos *lead times*, defendendo o uso de stocks de segurança e tempos

de espera de segurança. Isto levou ao desenvolvimento do MRPII, modelo que verificava se existia capacidade suficiente para tornar viável um determinado plano *Master Production Schedule* (MPS), caso contrário o planeador produzia um novo MPS ou ajustava, manualmente, as capacidades do sistema. O Kanban é descrito como um sistema mais adequado a ambientes *Make to Order* (MTO) uma vez que, só serão lançadas ordens apenas quando necessário nas estações seguintes, ou seja, em ambientes estáveis e repetitivos.

Van Vliet et al. (2000) propõem uma nova classificação própria adequada a sistemas reais complexos e que auxiliem na conceção e seleção de PPCP's mais adequados ao espaço fabril uma vez que, esta área é uma lacuna entre a teoria e a prática da gestão de operações que não foi alterada com os anos. É defendido que quanto mais repetitivo for o sistema produtivo maior será a probabilidade de serem escolhidos sistemas mais simples como o Kanban, contrariamente, o MRP será a escolha mais adequada. O DBR/OPT é descrito como mais adequado para sistemas semi-repetitivos, ou seja, que apresentem alguma estabilidade nos produtos e processos mas não sendo tão previsíveis como o Kanban nem totalmente variáveis como o MRP. Para além do nível de repetitividade, é também indicado que, por exemplo, o MRP poderá ser adotado como sistema base, isto é, define quais serão os materiais comprados, movimentados, como será o planeamento da sua produção e a forma como responderá a oscilações mas, simultaneamente, o sistema poderá possuir outra parametrização, ou seja, a personalização e configuração do seu funcionamento, dependendo da complexidade do seu fluxo produtivo.

Pibernik (2006) desenvolve um modelo de otimização que permite equilibrar a autonomia das estações com o desempenho global do sistema. O Kanban e o CONWIP são utilizados como exemplos de aplicação sendo realizada uma breve análise do seu funcionamento e uma comparação entre as mesmas. Assim, o funcionamento do Kanban é descrito como tendo início no momento em que uma estação se encontra livre e existe um contentor com uma peça na estação a montante. A peça continua alocada ao contentor até que volte a existir um contentor vazio disponível na estação seguinte. Quando um contentor ficar disponível, a peça é transferida para a próxima estação e o seu contentor volta à estação anterior, sinalizando disponibilidade para receber outra peça. Na última estação, os contentores cheios aguardam a procura do cliente. Assim o *design* do Kanban é identificado pelo número de contentores em cada estação. Já no funcionamento do CONWIP cada contentor irá conter uma peça e um cartão alocado, que irá percorrer o fluxo produtivo desde o seu início até ao processo estar finalizado. Quando o contentor chegar ao fim do fluxo, o produto concluído é retirado e o contentor, juntamente com o cartão, retornam ao início, onde aguardam um novo lote de produtos. Assim, o *design* do CONWIP é identificado pelo número total de contentores no sistema.

Meyr e Wagner (2006) identificam formas de contornar as perdas produtivas

desde a adoção da abordagem *overplanning* (onde são produzidas mais peças do que as estipuladas no MPS para cobrir variações na procura, o que resulta em elevados custos de stock) até ao dimensionamento e implementação de um *buffer* global no MRP. É também proposto um dimensionamento dinâmico de lotes como forma de contrariar a incerteza nas datas de entrega, ou seja, determinar a quantidade de unidades a produzir ou de encomendas em cada período de tempo tendo em conta uma procura variável. São, também, analisadas as formas como os tempos de entrega são influenciados ou influenciam o dimensionamento de lotes e as restrições de capacidade no MRPII com *Bill Of Materials* (BOM) complexa e incertezas quer na procura quer nos tempos de entrega. Finalmente os autores discutem a integração do MRP com inteligência artificial de forma a proporcionar um ambiente mais realista na procura e na satisfação do cliente.

Sato e Khojasteh-Ghamari (2012) afirmam que existem estudos, como descrito em Gstettner e Kuhn (1996) e Spearman e Zazanis (1992), e em que demonstram que o Kanban resulta num *Work In Process* (WIP) mais reduzido comparativamente ao CONWIP desde que a distribuição dos cartões no Kanban seja adequada, por exemplo. Porém, existem vários autores que defendem que o CONWIP apresenta um melhor desempenho em relação ao Kanban quando os tempos de processamento são variáveis. É também discutido que em ambientes produtivos em que há movimentação da mesma quantidade de cartões CONWIP e cartões Kanban, o *throughput* (quantidade de peças concluídas no final do fluxo produtivo) do Kanban é menor que o do CONWIP. Isto acontece uma vez que, o Kanban divide o fluxo produtivo em sub-circuitos de menor dimensão aumentando a probabilidade de existir um bloqueio dos cartões num desses sub-circuitos. Assim, quer o stock quer a quantidade de cartões são considerados parâmetros críticos para o desempenho de ambos os sistemas. O artigo apresenta uma nova metodologia para comparar o desempenho do Kanban e do CONWIP, a teoria dos sistemas de transações por *tokens* que defende que o WIP, tempo de ciclo e *throughput* são influenciados pela estrutura do processo produtivo e também pela quantidade de cartões.

Já González-R et al. (2012a) os PPCP's são analisados de acordo com duas abordagens: *pull* e *push*. Os autores consideram que em sistemas *push*, o lançamento das ordens é agendado com base na procura e o material é lançado de forma constante ou de acordo com MPS. Contrariamente, em sistemas *pull* as ordens de lançamento são autorizadas tendo em conta o estado atual do sistema procurando equilibrar o nível de serviço desejado com o nível mínimo de WIP. São também definidos três mecanismos de ativação para o lançamento de material: sistemas baseados em cartões, tipicamente utilizados em sistemas *pull*, pois recorrem a cartões como mecanismo de ativação da produção; sistemas baseados em tempo, onde são utilizados critérios temporais para processar as ordens e por fim sistemas baseados em excedentes, onde a entrada de uma ordem está dependente da diferença da procura

acumulada (quantidades de materiais que são acumuladas ao longo do tempo) com a produção agregada (quantidades de materiais efetivamente produzidas, concluídas e entregues).

O CONWIP é descrito como um sistema baseado em cartões que tem sido utilizado como referência nas comparações entre os diferentes modelos mesmo ainda existindo dúvidas quanto ao seu funcionamento, isto é, se deverá ser considerado *push* ou *pull* pois apresenta características de ambos. O DBR/OPT é apresentado como um exemplo de sistema baseado no tempo e interpretado como um sistema híbrido pois, em algumas variantes do sistema, o fluxo da linha é controlado por cartões de início até ao gargalo e o restante sistema funciona como sistema *push*, ou seja, do gargalo até ao fim da linha as tarefas são processadas tendo em conta o ritmo do gargalo. Os autores não consideram como um sistema baseado em cartões pois, originalmente, o DBR/OPT é controlado por *buffers* de tempo. O Kanban é considerado como sistema baseado em cartões pois utiliza esses elementos de sinalização visual para o seu funcionamento.

Sato e Khojasteh-Ghamari (2012) descrevem que o gargalo é um ponto no processo produtivo que limita a quantidade de produto que um sistema consegue produzir, tornando-o pouco eficaz perante mudanças rápidas na procura. De acordo com o sistema OPT, se não for planeado mais trabalho para o recurso com gargalo do que aquele que, efetivamente, consegue produzir, e se forem utilizados tamanhos de lote maiores nas operações que envolvem esse recurso, é possível otimizar a utilização do gargalo. É também referido que o MRP é vantajoso em custos de *setup* reduzidos (sistema *push*), mas a sua aplicação pode resultar em stocks elevados, já que a procura é incerta. Em ambientes com elevada variabilidade de produtos, o MRP mostrou ser mais eficiente que o Kanban, especialmente em questões relacionadas ao stock e capacidade de resposta.

O CONWIP baseia-se no lançamento de ordens para o espaço fabril com base na procura do produto final. É apresentada como desvantagem o descontrolo dos níveis de stock em cada etapa do processo produtivo levando à acumulação de stock na operação a montante do gargalo. Quer o Kanban como o CONWIP mantêm os níveis de stock baixos com o controlo do WIP porém levam a custos mais elevados de *setup*. Contudo, o CONWIP é referido como mais robusto pois consegue gerir de forma mais eficaz o nível de WIP. É ainda realizada uma breve análise do DBR pois é considerado, pelos autores, semelhante ao MRP com a diferença que o DBR foca-se na operação correspondente ao gargalo, e todos os processos devem seguir esse ritmo produtivo.

Foi desenvolvido por Manikas et al. (2015), dois tipos de modelos, um manual e outro com recurso ao Excel, com o objetivo de auxiliar os alunos, em contexto de aula, a uma melhor compreensão do funcionamento do MRP, DBR/OPT, JIT

e CONWIP. Assim, para o modelo manual foi realizado o jogo do dado que simbolizava uma linha produtiva onde, num dado período, cada estação de trabalho poderia, teoricamente, produzir quase o mesmo número de peças. De forma a que os alunos verificassem a veracidade do modelo manual, o jogo foi executado várias vezes e a média dos resultados obtidos foram colocados em Excel. Variando parâmetros como o WIP, a capacidade de produção por operação e o valor de "variação máxima em torno da média" foi possível evidenciar as diferenças dos PPCP's em relação aos diferentes níveis de variabilidade, de stock e da produção total. Foi possível perceber que o MRP permite maximizar a produção, mas com níveis de stock elevados o que leva também a um *lead time* mais longo. Já nos sistemas CONWIP e DBR/OPT é possível obter um *throughput* elevado como no MRP, mas com níveis de stock inferiores. Durante o modelo manual foi possível evidenciar que, para aquelas condições, sistemas CONWIP e DBR lidam de forma mais eficaz com ambientes de alta variabilidade comparativamente aos métodos tradicionais como o MRP.

O artigo Fernandes et al. (2022) é direcionado para uma análise de estudos comparativos de PPCP's em ambientes MTO, utilizando uma revisão sistemática da literatura, para descrever quais os fatores de controlo e condições de produção que influenciam o seu desempenho. Os autores destacam que a forma como são executados, ou seja, a capacidade do sistema em reagir a atrasos, reagir sem considerar o estado real do espaço fabril ou dados incompletos, são algumas das razões que influenciam o seu desempenho. Para além disto, é também referido que o momento e como as ordens são lançadas para o espaço fabril, impactará os indicadores de produtividade, *lead time* e a utilização dos recursos. Dependendo se se considere a carga como diária, semanal, etc. (estratégia de agregação) também afetará o desempenho do sistema bem como a forma como o sistema prevê a carga futura.

Os autores Missbauer e Uzsoy (2019) descrevem o funcionamento do MRP. Referem, também, que este utiliza tempos de entrega exógenos (fixos) para facilitar os cálculos de produtos em espaços fabris mais complexos, lançando ordens o mais tardiamente possível desde que as mesmas sejam concluídas atempadamente. Assim, cada produto demora sempre a mesma quantidade de tempo a ser produzido independentemente do WIP ou da capacidade das máquinas, o que o torna num sistema que ignora a realidade do espaço fabril onde está implementado. O artigo refere o MRP como um sistema que se torna mais inflexível perante oscilações na procura, contribuindo para o desequilíbrio do fluxo de materiais entre as unidades produtivas, para isso são propostos stocks, tempos de entrega ou capacidade de segurança para este sistema tornar-se mais eficiente perante incertezas quer na produção quer na procura.

Em Viana et al. (2021) é definido que no MRP, os produtos são representados por uma BOM estática e o *lead time* de cada produto é fixo ao longo de todo o horizonte do planeamento. Por este motivo, a sua gestão em ambientes *Engineering*

to Order (ETO) torna-se complexa, ou seja, a encomenda para um determinado projeto é realizada na fase de execução e como resultado, o produto terá de satisfazer as encomendas dos clientes. Já o *Workload Control* (WLC) é descrito como um sistema que utiliza três pontos de confirmação: aprovação do cliente para a ordem; confirmação interna quanto à disponibilidade dos materiais e a verificação do WIP no espaço fabril. Neste sistema e tendo em conta o ambiente ETO, as ordens devem ser agendadas de forma a dar entrada no espaço fabril o mais tardiamente possível para que as datas programadas sejam mais exatas, ou seja, será melhor optar por esperar para iniciar a produção desde que não ultrapasse o prazo de entrega do produto. Por fim, o CONWIP é descrito como adequado quando existe uma elevada variedade de produtos uma vez que a alocação dos seus cartões a cada um torna a sua gestão mais simples.

De acordo com Thürer et al. (2023), se os prazos de entrega planeados se tornarem imprecisos poderá prejudicar o desempenho do MRP ou que seja necessário adicionar existências de segurança, o que poderá ser dispendioso. Assim, o estudo foca-se se em contextos em que os tempos planeados dependem dos tempos de produção realizados. Para estes contextos é crucial refletir sobre o *lead time syndrome*. Este fenómeno refere-se às discrepâncias entre os tempos de produção realizados e os tempos de produção planeados resultarem na conclusão tardia de encomendas, o que levará ao aumento dos tempos de produção planeados para contrariar este obstáculo. Como resultado, o trabalho terá de ser iniciado mais cedo, o que levará a um aumento das cargas de trabalho e dos tempos de produção realizados no sistema produtivo, conduzindo, assim, a um ciclo vicioso que contribui para uma tomada de decisões instável e ineficaz. Assim, o artigo implementa o MRP e o DBR/OPT no *software* SIMIO de forma a avaliar o impacto do *lead time syndrome* nestes PPCP's.

Em suma, a presente revisão de literatura permitiu identificar os PPCP's convencionais mais estudados durante os últimos 20 anos apresentando vantagens e limitações de cada modelo na sua implementação. No capítulo seguinte, cada modelo será descrito detalhadamente a partir de uma análise aprofundada do seu funcionamento, pressupostos, mecanismos de controlo utilizados e as fases que afetarão num PPCP.

2.1 MRP/MRP II

Segundo Ptak e Smith (2011) o MRP diz respeito a um conjunto de técnicas utilizadas na reposição de stock, ou seja, o MRP repõe o stock de forma planeada. Proposto e consolidado por Joseph Orlicky em 1975, este sistema tem como principal função calcular quais os materiais e componentes e em que quantidades devem ser encomendados ou produzidos e ainda quando é que será necessário fazê-lo.

Antes de ser iniciada a produção de qualquer produto ou processo, as matérias primas utilizadas na sua produção têm de estar disponíveis ou armazenadas. Assim, o MRP assegura as encomendas e que, as mesmas serão entregues atempadamente de forma a mitigar atrasos no fluxo produtivo, garantindo um processo de produção sem interrupções.

O MRP procede ao cálculo tendo em conta a lista de materiais, que possui todas as informações dos produtos da empresa, os dados de stock que apresentam as quantidades de produtos armazenadas e o plano mestre de produção ou MPS que determina em que momento os produtos devem estar disponíveis, em função das encomendas e previsões da procura. Assim, o funcionamento do sistema começa por verificar os produtos resultantes do MPS e compara-os com a BOM. O sistema então verifica o stock disponível em conjunto com as encomendas já recebidas para determinar quais produtos poderão ser produzidos. Considerando os prazos de entrega (ou produção), são calculadas as quantidades a serem entregues garantindo que não ocorram interrupções no fornecimento.

Supondo, agora, que uma empresa do setor automóvel produz em 7 dias:

- 4 jantes;
- 1 pára-choque;
- 1 capô;
- 4 portas.

O MRP irá analisar a BOM, o stock e o MPS de forma a verificar a quantidade de peças que são necessárias para satisfazer a previsão de vendas, as peças armazenadas e prever a necessidade de produção de 500 conjuntos completos por semana.

Assim, para fabricar 500 conjuntos são necessárias:

- 2000 jantes (500×4);
- 500 pára-choques (500×1);
- 500 capôs (500×1);
- 2000 portas (500×4).

De seguida, o sistema analisa o stock atual disponível e calcula as necessidades líquidas, ou seja, se existirem 200 jantes, 30 pára-choques, 40 capôs e 100 portas em stock, então será necessário encomendar:

- 1800 jantes ($2000 - 200$);
- 470 pára-choques ($500 - 30$);
- 460 capôs ($500 - 40$);

- 1900 portas (2000 – 100).

Tendo em conta os seguintes *lead times*:

- 5 dias para as jantes;
- 6 dias para os pára-choques;
- 7 dias para os capôs;
- 4 dias para as portas.

Por fim, o MRP irá determinar o momento para o lançamento das ordens de compras ou de produção de acordo com os prazos previstos. Torna-se evidente que, por exemplo, as encomendas dos capôs, com um *lead time* de 7 dias, devem ser realizadas uma semana antes do início da produção uma vez que, estes produtos demoram exatamente 7 dias até estarem disponíveis para serem, então, lançados para o fluxo produtivo.

Relação do MRP com o PPCP

De acordo com Ávila et al. (2022), o PPCP, em conjunto com o MRP, é capaz de auxiliar as empresas a responder a quatro perguntas: “Quais produtos?”, “Em que quantidades?”, “A que nível?” e “A que custos?” dado que o PPCP controla e planeia a produção enquanto o MRP trata do planeamento das necessidades de materiais. Desta forma é garantida a disponibilidade de materiais no momento certo sem comprometer a continuidade do fluxo produtivo.

Percebe-se na Figura 2.3 que existem outras fases do funcionamento do PPCP. O Planeamento Estratégico (PE), como exposto por Ávila et al. (2022), define a missão e a visão da empresa, bem como seu estado atual permitindo traçar objetivos a longo prazo, tal auxilia a empresa na tomada de decisões. O planeamento envolve uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*) onde as estratégias consideradas visam melhorar a eficiência operacional, reforçar a competitividade da empresa, aumentar as vendas e ainda possibilitar uma resposta às tendências de mercado adaptando-se às suas variações sem perder a estabilidade operacional.

O Planeamento Agregado da Produção (PAP) estabelece o equilíbrio entre a procura do mercado e a capacidade produtiva da empresa, assegurando a gestão eficaz dos recursos disponíveis no espaço fabril. Estabelece, ainda, os níveis de stock em função da procura e dos níveis de serviço pretendidos e garante o cumprimento dos prazos de entrega aos clientes. Torna-se fundamental definir estratégias que permitam equilibrar a procura com a capacidade produtiva e ainda garantam a redução de custos sendo estas de dois tipos:

- Estratégias de nivelamento: consistem em manter a capacidade produtiva constante e possuem duas variantes, o nivelamento da mão-de-obra pela média da procura, isto é, o número de trabalhadores e, a respetiva, carga horária mantêm-se constantes, o ajuste é feito com base na média da procura e o stock acumulado servirá para suprir períodos de alta procura. A outra variante diz respeito ao nivelamento da mão-de-obra juntamente com subcontratação ou trabalho extraordinário onde também se contrata um número fixo de trabalhadores e a sua carga horária é constante porém inferior à procura média do horizonte do Plano Agregado da produção, por esse motivo, em períodos de procura alta a empresa recorre a subcontratações e ao trabalho extraordinário.
- Estratégias adaptativas: consistem na adaptação contínua da capacidade produtiva tendo em conta as variações da procura em tempo real. Estas possuem três variantes, a adaptação à procura de contratação e dispensa dinâmica de mão-de-obra que contrata ou despede trabalhadores consoante o aumento ou diminuição da procura. A estratégia de adaptação à procura por produção variável que define que o número de trabalhadores é fixo porém terá de existir maior flexibilidade de horários, trabalho extraordinário e subcontratações. Por fim, o excesso permanente de capacidade onde o número de trabalhadores é dimensionado tendo sempre em conta a procura máxima e a produção é continuamente ajustada de acordo com as variações da procura.

Estas estratégias são adotadas de forma mista, ou seja, dá-se a combinação de duas ou mais estratégias na mesma empresa e também podem ser alteradas regularmente.

Do PAP surge o Planeamento Diretor da Produção (PDP), que determina quais os produtos e, respetivas, quantidades que o sistema produtivo terá de disponibilizar a cada setor da empresa (por exemplo, montagem, embalagem, acabamento e distribuição). A partir deste planeamento surgem as necessidades de materiais e a forma como se devem organizar e relacionados para responder de forma eficiente à procura. A adoção das estratégias no planeamento anterior serve para determinar quais os produtos, em que quantidades e períodos é que os mesmos deverão estar concluídos para responder à procura e posteriormente serão disponibilizados num plano, PDP. Este serve para facilitar a compreensão de informações essenciais dos produtos por vários departamentos, permitindo ainda, a partir dele, por exemplo, realizar uma estimativa das necessidades brutas de materiais, efetuar uma previsão de vendas, etc.

O Planeamento da Capacidade Crítica (PCC) está relacionado com o PDP devido à importância do mesmo na gestão da produção da empresa. Desta forma, torna-se necessário verificar se o PDP possui a capacidade necessária para a sua

correta execução sendo que deve aproximar-se o mais possível da realidade da empresa e deverá incluir testes, especialmente, nos recursos produtivos mais limitados ou restritivos (gargalos).

Relativamente ao Planeamento das Necessidades em Ordens de Fabrico e Compras (PNOFC), este é o ponto de partida para o planeamento a curto prazo visto que até este plano, todos os planeamentos anteriormente abordados são considerados para médio e longo prazo. O PNOFC foca-se na definição e cumprimento de regras e procedimentos para garantir que as quantidades, prazos, qualidade e custos sejam respeitados promovendo a eficiência da empresa.

Este planeamento pode dividir-se em duas etapas: Planeamento das Necessidades em Ordens, que, com recurso ao MRP, determina quais as necessidades de materiais a produzir, as suas quantidades e para quando terão de estar finalizados com o objetivo do PDP e dos prazos serem satisfeitos e ainda o Planeamento de Ordens de Fabrico e Compras que, recebe estas informações e as transmite para os postos de trabalho dimensionando a carga de trabalho no mesmo. Desta forma, o recurso ao MRP nesta etapa serve para antecipar e detalhar as ordens desta fase.

Torna-se evidente que, à medida que avançamos nas fases do PPCP, a duração dos prazos vai sendo encurtada, ou seja, inicia-se com o Planeamento Estratégico a longo prazo, segue para o PAP e o PDP a médio prazo. A partir do PNOFC até à fase final do PPCP (controlo da progressão ou monitorização) são considerados a curto prazo.

As fases que fazem parte do *scheduling* são as seguintes: o lançamento das ordens, onde se autoriza o início da produção, a alocação onde se atribui as operações aos recursos produtivos responsáveis pela sua execução, a sequenciação onde são definidas as ordens destas operações e, por fim, o escalonamento detalhado/calendarização que designa os prazos para cada ordem de trabalho. A fase alusiva ao controlo da progressão ou monitorização, tem como objetivo garantir o cumprimento dos prazos estabelecidos no escalonamento, a otimização dos recursos, a redução de stock em curso e a disponibilidade dos produtos ou serviços, tudo isto deverá estar alinhado com os objetivos estratégicos da empresa.

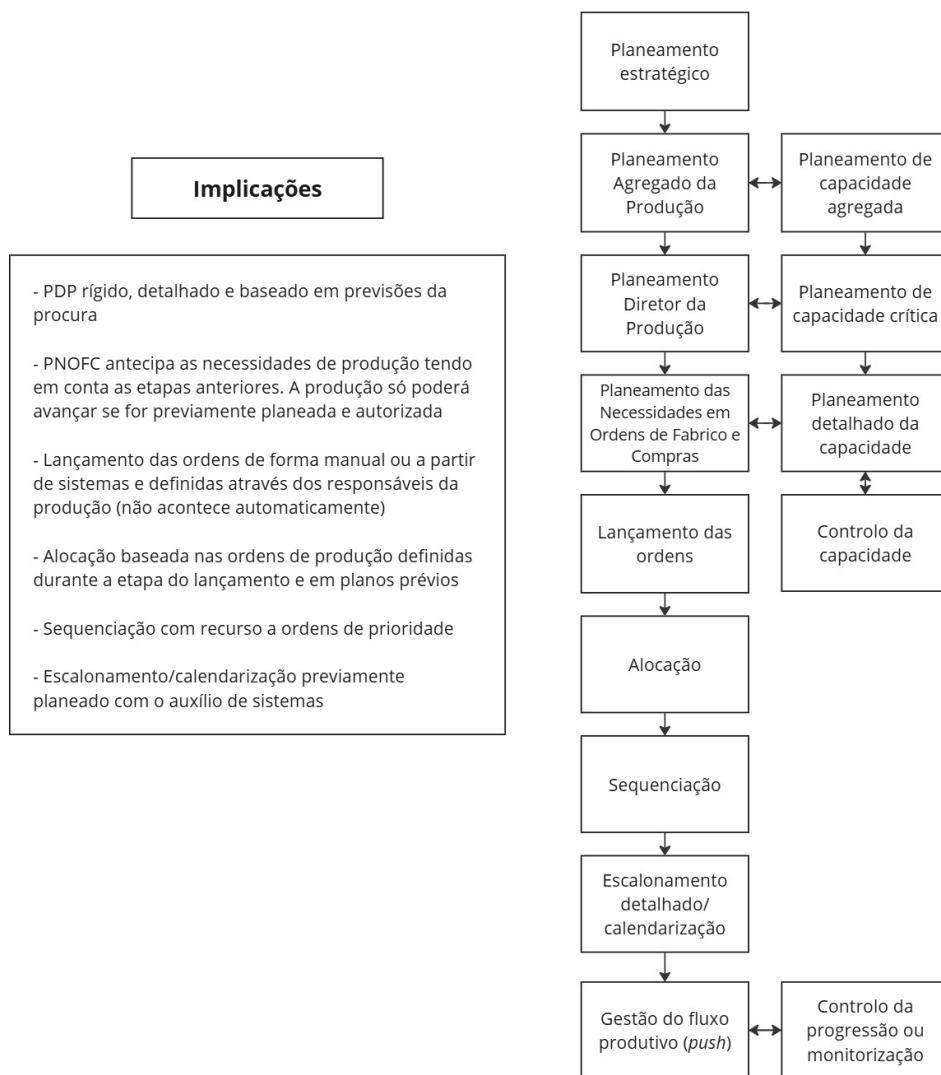


Figura 2.3: Fases do PPCP afetadas pelo MRP (Ávila et al. (2022)).

O MRP tem como desvantagem a identificação tardia dos problemas, ou seja, só são detetados após impactarem o sistema produtivo, visto que o MRP funciona a partir de previsões. Como o MRP não possui mecanismos de adaptação em tempo real, qualquer flutuação que eventualmente surja no processo produtivo não é detetada a tempo de ser evitada. Isto poderá resultar em acúmulo desnecessário de stock ou à gestão ineficaz de materiais, elevando a quantidade de desperdícios e necessidade constante de reajustes do processo produtivo. Além disso, segundo Hopp e Spearman (1996), o MRP conduz a níveis elevados de WIP e longos *lead times*. Desta forma, o MRP, se combinado com abordagens *pull*, assegura uma maior flexibilidade e equilíbrio na relação entre a procura (em tempo real) e a produção, sem comprometer a produtividade do sistema (Shah (2018)).

Em 1980 surge o MRPII como uma evolução do MRP. De acordo com Jiang e Han (2009), este método, desenvolvido por Oliver Wight, agrega sistemas de gestão

empresarial, que se relacionam entre si, a um sistema de simulação. Este sistema analisa diversos cenários relacionados com a capacidade de gerir os materiais. Este progresso viabilizou a adoção de sistemas *Enterprise Resource Planning* (ERP) que, segundo Soares et al. (2024), tornaram-se essenciais na integração de processos de PPCP. A tendência em definir *lead times* mais longos que o necessário é uma das desvantagens do MRPII, comprometendo a eficácia do sistema produtivo como também da previsão do mercado, reduzindo a sua precisão.

Tal como acontece no MRP, o MRPII não verifica automaticamente a capacidade real do sistema produtivo. Em vez disso, considera uma capacidade infinita, desprezando quaisquer limitações que as máquinas possam ter, levando a gargalos de produção, atrasos no cumprimento dos prazos de entrega e reajustes manuais frequentes. Além disso, o modelo assume um nível fixo de stock de segurança, ou seja, assume sempre o mesmo valor independentemente de flutuações na procura, resultando em excessos ou rutura de stock (Jiang e Han (2009)).

2.2 Modelos de Reposição de Stock

De acordo com autores como Setyadi et al. (2024), assegurar o equilíbrio de um nível de stock adequado é fundamental para otimizar a *performance* operacional do espaço fabril e a satisfação dos clientes. O excesso de stock pode levar a elevados custos de armazenamento e à eventualidade dos produtos se tornarem obsoletos, por outro lado, a falta de stock irá comprometer o desempenho da empresa pois não será possível responder às encomendas dos clientes. Assim, este equilíbrio deve ser mantido considerando tanto as necessidades de stock como a procura do mercado.

Os modelos de reposição de stock, contrariamente ao MRP, são utilizados em contextos de procura incerta e independente, ou seja, em ambientes dinâmicos. Estes apresentam uma implementação simples e de reduzida complexidade operacional uma vez que são implementados de forma manual sem depender de *softwares* (Munyaka e Yadavalli (2022)).

Assim a escolha do modelo de reposição de stock mais adequado vai depender das características da procura, dos produtos e das incertezas do mercado. Os modelos podem ser modelos determinísticos ou modelos estocásticos, ambos serão abordados de uma forma genérica.

De acordo com Munyaka e Yadavalli (2022), nos modelos determinísticos todos os fatores, parâmetros envolvidos e condições são conhecidos e previamente definidos. Assim, como a procura é previsível, as operações de stock podem ser planeadas tendo em conta a previsão da procura de cada produto. Os objetivos dos modelos determinísticos são a redução de custos associados aos tempos de produção e de preparação, horas extraordinárias e custos de reposição de stock e de eventuais ruturas deste.

Nos modelos estocásticos, em oposição ao que acontece nos modelos determinísticos, existem fatores e condições que não são totalmente conhecidas. Assim, como a procura e o prazo de entrega/produção são incertos, considera-se o stock de segurança para garantir um nível de serviço adequado assegurando o normal funcionamento do sistema (Herrera Vidal (2023)).

A reposição do stock pode ser feita de forma contínua ou em períodos fixos como indicado a seguir.

2.2.1 Modelos de Revisão Contínua

Nos modelos de revisão contínua, sempre que o nível mínimo de stock ou *Reorder Point* (ROP) é atingido, deverá ser feita a encomenda desse material. Assim, este ponto indica o momento exato em que deve ser feita a reposição de stock de forma a manter os seus níveis no ponto ótimo, seguindo, por isso, uma abordagem *push* (Abdullah et al. (2013); Badinelli (1992)). Desta forma é assegurado o controlo contínuo do stock.

O stock de segurança corresponde a um stock suplementar que tem como objetivo assegurar a continuidade do fluxo produtivo mesmo que existam flutuações na procura ou no tempo de espera da reposição dos produtos. Este stock permite que as empresas evitem a sua rutura e consigam responder, eficazmente, às necessidades dos clientes (Herrera Vidal (2023)).

Na Figura 2.4 observa-se que, com a diminuição do stock, o ROP é atingido sinalizando a necessidade de uma nova encomenda. Enquanto o pedido de encomenda é efetuado e a mesma não chega ao sistema, o nível de stock continua a diminuir até atingir o stock de segurança. Por sua vez, este tem como função responder à procura do produto, até à chegada da nova encomenda. Assim que a encomenda dá entrada no espaço fabril, o nível de stock volta até ao seu valor máximo assegurando a continuidade do fluxo de abastecimento da empresa.

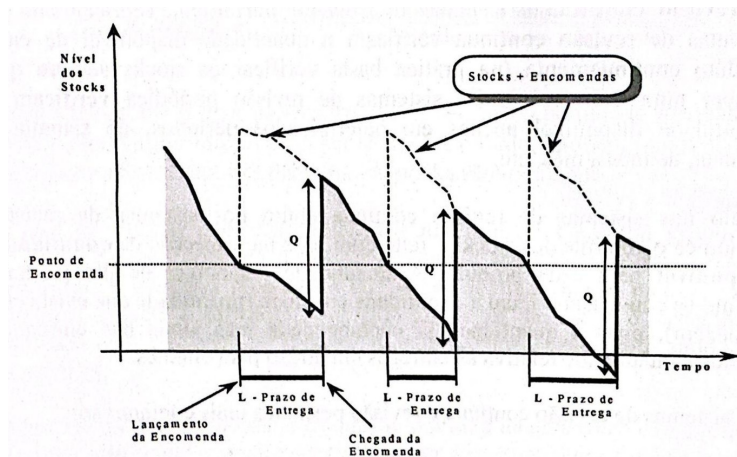


Figura 2.4: Fases de abastecimento de um Modelo de Revisão Contínua (Gonçalves (2006)).

Com o objetivo de uniformizar e auxiliar na interpretação das expressões utilizadas nos modelos de revisão contínua, segue-se a nomenclatura adotada e as, respetivas, definições:

- D = taxa média de procura por unidade de tempo;
- T = intervalo de tempo entre as revisões de stock;
- LT = *lead time*;
- LT_T = *lead time total*;
- SS = stock de segurança;
- z = fator de segurança (determinado pelo nível de serviço desejado, baseado na distribuição normal);
- σ_D = desvio padrão da procura;
- σ_{LT} = desvio padrão do *lead time*;
- T_{σ_D} = unidade de tempo referente ao cálculo de σ_D ;
- $Q_e = QEP$ = quantidade económica de encomenda/produção;
- L = Custo de lançamento, por pedido;
- h = Custo de posse, por produto e por período.

Segundo Gonçalves (2006) a expressão geral para o cálculo do ROP, tendo em conta que as quantidades encomendadas são constantes, é apresentada na equação (2.1).

$$ROP = D \cdot LT + SS \quad (2.1)$$

Segundo King (2011), nos modelos estocásticos, o stock de segurança pode ser determinado a partir das equações (2.2), (2.3) e (2.4) dependendo da variabilidade considerada sendo na procura, no *lead time* ou em ambos.

- Para variações apenas na procura (*lead time* fixo):

$$SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{\frac{LT_T}{T_{\sigma_D}}} \quad (2.2)$$

– Para variações apenas no *lead time* (procura constante):

$$SS = z \cdot \sigma_{LT_T} \cdot D \quad (2.3)$$

– Para variações na procura e no *lead time* (independentes):

$$SS = z \cdot \sqrt{\left(\frac{LT_T}{T_{\sigma_D}} \cdot \sigma_D^2\right) + (\sigma_{LT_T} \cdot D)^2} \quad (2.4)$$

Existe ainda uma fórmula do stock de segurança mais simplificada que pode ser obtida da multiplicação do fator de segurança z com o desvio padrão da procura durante o período de aprovisionamento, tempo total desde a decisão de encomendar um produto até ao momento em que o mesmo estará disponível como mostra a equação 2.5.

$$SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{LT} \quad (2.5)$$

Para a determinação do tamanho do lote/encomenda quer em modelos determinísticos quer em modelos estocásticos, é utilizado o Modelo de Lote Económico de Compra (*Economic Order Quantity*). Este modelo tem como objetivo garantir que a quantidade a encomendar (Q_e) deverá ser suficiente para assegurar a continuidade de abastecimento no fluxo. Além disso, este assume que a procura é constante e conhecida bem como o *lead time* e visa reduzir custos de armazenamento, mitigando o risco da acumulação de grandes quantidades de stock em armazém (Setyadi et al. (2024)).

O cálculo da quantidade a encomendar é dado pela equação (2.6).

$$Q_e = QEP = \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot D}{h}} \quad (2.6)$$

De acordo com Munyaka e Yadavalli (2022), inicialmente, o nível de stock é máximo. Porém, com o passar do tempo, este diminui linearmente representando a procura do produto. Quando o stock atinge o ROP, é efetuado um novo pedido do respetivo produto, seguindo o princípio da Q_e .

Assim, antes da implementação do Q_e , a empresa deverá cumprir um conjunto de premissas, nomeadamente:

- a procura do produto é conhecida, constante e independente dos restantes produtos;

- o *lead time* é conhecido;
- a quantidade encomendada deve ser recebida num único lote e ao mesmo tempo;
- descontos por quantidade não são aplicáveis;
- o custo de configuração e de manutenção são os únicos custos variáveis;
- a rutura de stock pode ser completamente evitada se as encomendas forem realizadas atempadamente.

Supondo, agora, o seguinte exemplo da implementação de um modelo de revisão contínua:

Uma empresa de calçado que fabrique solas específicas em todas as suas linhas de produção. Essas solas são consumidas de forma constante e cerca de 2500 por dia. De acordo com o modelo de revisão contínua, definiu-se que:

- o ROP é de 5000 unidades;
- o SS de 4000 unidades;
- o LT para a entrega das solas é de 4 dias;
- a quantidade a encomendar é de 10000 unidades.

Assim, o funcionamento do sistema será o seguinte:

- O stock será controlado continuamente e, à medida que as solas são consumidas, o stock diminui;
- Quando atingido um nível de stock de 5000 unidades, é feita uma ordem de compra de 10000 solas;
- Durante o período de espera de 4 dias, correspondente ao LT, o stock continua a ser consumido. O SS de 4000 unidades garante que a produção não é interrompida durante o LT;
- Dá-se a reposição de stock assim que a nova encomenda é recebida e garantindo a continuidade do processo produtivo.

2.2.2 Modelos de Revisão Periódica

Contrariamente aos modelos de revisão contínua, onde o nível de stock é reabastecido quando atinge o ROP, nos modelos de revisão periódica, o reabastecimento é feito em intervalos de tempo fixos (R) e de forma regular, como representado na Figura 2.5, sendo por isso, considerado um modelo *push*. Desta forma, a sua reposição só

ocorrerá tendo em conta previsões da procura ou se for necessário para equilibrar os níveis de stock até à próxima revisão do stock sendo, por isso, um modelo adequado para produtos de baixa criticidade (Munyaka e Yadavalli (2022)).

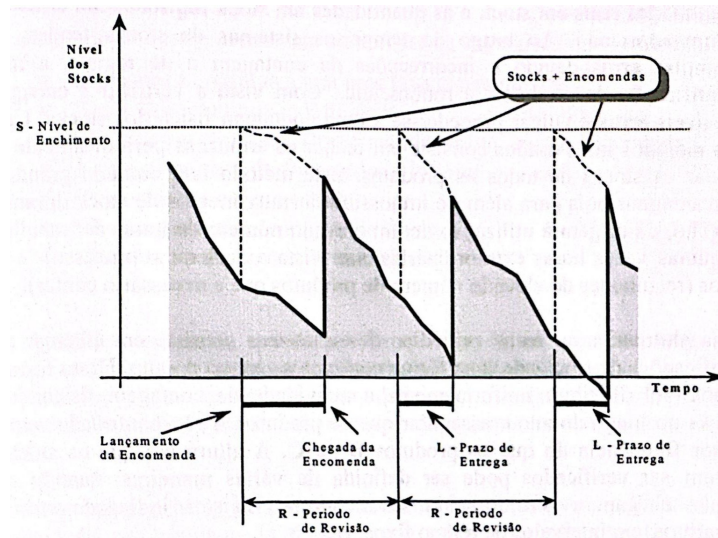


Figura 2.5: Fases de abastecimento de um Modelo de Revisão Periódica (Gonçalves (2006)).

Assim, em modelos de revisão periódica não faz sentido considerar o ROP mas sim o nível de stock máximo (S). Este nível é determinado pela procura expectável durante o período de revisão de um determinado produto acrescida ao stock de segurança de forma a cobrir possíveis variações na procura e no tempo de reposição (Herrera Vidal (2023)).

Segue-se a nomenclatura adotada e as, respetivas, definições dos modelos de revisão periódica:

S = nível de stock máximo;

I = stock disponível no momento da revisão;

D = taxa média de procura por unidade de tempo;

T = intervalo de tempo fixo entre as revisões de stock;

LT = *lead time*;

z = fator de nível de serviço (obtido através da distribuição normal padrão);

σ_D = desvio padrão da procura.

A quantidade a encomendar em sistemas de revisão periódicos de reposição de stock rege-se pela equação (2.7) (Gonçalves (2006)).

$$Q_e = S - I \quad (2.7)$$

De acordo com Gonçalves (2006) para modelos estocásticos, o cálculo do nível de stock máximo, como representado na equação (2.8), corresponde à quantidade

prevista de consumo durante todo o período de reposição, somada ao stock de segurança.

$$S = D \cdot (T + LT) + SS \quad (2.8)$$

Por sua vez, o stock de segurança é dado pela equação (2.9) resultante da multiplicação do fator de segurança z com o desvio padrão da procura durante o período de aprovisionamento, tempo total desde a decisão de encomendar um produto até ao momento em que o mesmo estará disponível. Este stock de segurança é aplicado apenas quando a procura é variável (*lead time* constante).

$$SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{T + LT} \quad (2.9)$$

O intervalo de tempo entre as revisões de stock (T) é então dado pela equação (2.10) (Ávila et al. (2022)).

$$T = \frac{Q_e}{D} \quad (2.10)$$

O fator z representa o nível de confiança de que não sucederá rutura de stock. Desta forma, quanto maior for z , maior será o stock de segurança. Este fator está relacionado com o nível de serviço (α), que é expresso a partir de uma distribuição normal padrão. Por exemplo, para um nível de serviço de 95%, o fator z é de 1,645, o que significa que o stock de segurança irá cobrir variações na procura até 1,645 desvios-padrão acima da média (King (2011)).

Segundo Rădășanu (2016), o nível de serviço é um indicador utilizado na reposição de stock e representa a probabilidade de não ocorrer a rutura do stock durante o próximo ciclo de reabastecimento. Desta forma, avalia a eficácia das políticas de stock com o objetivo de evitar que o número de encomendas diminua, ou seja, o nível de serviço é diretamente proporcional à satisfação dos clientes.

O nível de serviço é determinado pelo nível de stock relacionando-se, diretamente, com o stock de segurança. Esta relação garante que as encomendas são respondidas dentro dos prazos, assegurando a satisfação dos clientes, sem que a empresa incorra em custos elevados de armazenamento.

Para cumprir os requisitos que o nível de serviço impõe, a empresa deverá dedicar-se à capacidade de resposta, ao tempo e à flexibilidade das entregas e ainda garantir a fiabilidade e qualidade do sistema durante este processo.

Assim, o cálculo do nível de serviço é obtido através da equação (2.11) (Gonçalves (2006)).

$$\text{Nível de serviço} = \frac{\text{quantidade de encomendas lançadas num período de tempo}}{\text{procura total}} \quad (2.11)$$

Considerando a mesma empresa de calçado que fábrica solas específicas em todas as suas linhas de produção e que, também, são consumidas, cerca de 2500 unidades por dia. De acordo com o modelo de revisão periódica, definiu-se que:

- o T é de 7 dias;
- o consumo médio semanal é de 17500 unidades (2500×7);
- o SS de 4000 unidades;
- o LT para a entrega das solas é de 4 dias;
- o S desejado é de 25000 unidades.

Assim, o funcionamento do sistema será o seguinte:

- O stock é controlado uma vez por semana;
- Durante o período de revisão, calcula-se Q_e até ao S (25000 unidades), considerando I;
- A encomenda é feita de acordo com o consumo esperado durante o LT e o SS;
- Durante T o stock é consumido sem um controlo contínuo;
- Quando a nova encomenda entra no espaço fabril, repõem-se os níveis de stock, assegurando a continuidade do fluxo produtivo.

A Tabela 2.1 serve de resumo e comparação dos modelos, anteriormente, abordados.

Tabela 2.1: Análise comparativa dos Modelos de Revisão Contínua com os Modelos de Revisão Periódica.

Características	Modelos de Revisão Contínua	Modelos de Revisão Periódica
Tipo de monitorização	Contínua	Periódica
Momento do reabastecimento	Quando o ROP é atingido $ROP = D \cdot LT + SS$	Em intervalos de tempo T regulares e pré-definidos
Quantidade a encomendar	Fixa	Variável
Vantagens	Mitiga ruturas de stock	Simplicidade
Desvantagens	Custos elevados de monitorização	Maior risco de rutura de stock
Fórmulas Determinísticas	$ROP = D \cdot LT + SS$ $Q_e = \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot D}{h}}$	$T = \frac{Q_e}{D}$ $Q_e = S - I$
Fórmulas Estocásticas	LT fixo: $SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{\frac{LT_T}{T \sigma_D}}$ D constante: $SS = z \cdot \sigma_{LT_T} \cdot D$ D e LT independentes: $SS = z \cdot \sqrt{\left(\frac{LT_T}{T \sigma_D} \cdot \sigma_D^2\right) + (\sigma_{LT_T} \cdot D)^2}$ Simplificada: $SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{LT}$	$S = D \cdot (T + LT) + SS$ $SS = z \cdot \sigma_D \cdot \sqrt{T + LT}$

Relação dos Modelos de Reposição de Stock com o PPCP

Segundo Ávila et al. (2022), os modelos de reposição de stock anteriormente abordados irão afetar o PPCP sobretudo nas fases correspondentes ao PDP e PNOFC, intervindo na quantidade de produtos e no momento em que serão feitas as encomendas.

Os modelos de revisão de stock irão impactar, significativamente, a fase referente ao PDP. À semelhança dos modelos de revisão contínua, os modelos de revisão periódica são sistemas que visam garantir a disponibilidade de forma contínua de materiais, seja com níveis de reposição contínuos seja com níveis de reposição periódicos, respetivamente, prevenindo quaisquer paragens no processo de produção.

Relativamente à fase do PNOFC, dado que as ordens são geradas assim que o stock atinge o ROP, o funcionamento de modelos de reposição contínua torna-se mais dinâmico. Contrariamente, nos modelos de revisão periódica as ordens são lançadas em intervalos de tempo fixos, exigindo, por isso, um planeamento mais rigoroso.

2.3 PPCP com JIT

O PPCP desenvolve e controla todas as operações inerentes a um sistema produtivo para que este consiga responder, de forma eficaz, à procura dos produtos garantindo a disponibilidade de materiais nas quantidades adequadas, cumprindo os prazos de entrega e garantindo a qualidade com os menores custos.

Sob esta perspetiva, princípios como o JIT implementado segundo abordagens específicas, como o Kanban, CONWIP e o DBR, adotando organizações e controlos distintos do fluxo produtivo, impactando no comportamento do PPCP. Assim, será analisado como cada abordagem funciona, como influencia o PPCP e as razões destas implicações.

2.3.1 JIT com abordagem Kanban

Desenvolvido por Taiichi Ohno, o Kanban é um sistema de controlo de produção utilizado no JIT que veio eliminar a dependência de um planeamento informatizado recorrendo a uma abordagem visual para gerir o fluxo produtivo (Sugimori et al. (1977)).

O seu funcionamento baseia-se numa abordagem *pull* que garante a produção de um determinado produto apenas quando existir a procura do mesmo. Isto leva à redução dos níveis de WIP enquanto equilibra o nível de produção com a procura, resultando num menor número de falhas e em níveis de stock reduzidos (González-R et al. (2012b)).

De acordo com Kumar e Panneerselvam (2007), a adoção deste sistema também levou à redução de custos associados à aquisição de equipamento tecnológico dispendioso, graças à utilização de cartões, que proporcionam um controlo mais

económico e visual dos processos produtivos. Estes cartões podem ser físicos ou digitais e contêm informações essenciais tanto para a conceção do produto como para as suas etapas durante o processo produtivo. Assim, não poderá ocorrer nenhuma movimentação ou produção de materiais sem que antes exista um registo no cartão.

Na perspectiva de Ávila et al. (2022) o Kanban clássico é constituído, essencialmente, por dois cartões ou kanbas: o kanban de produção e o kanban de transporte, porém também é possível existir um único cartão com a função de controlar a produção e o, respetivo, fluxo produtivo num sistema JIT. Para a execução desta metodologia são necessários contentores capazes de transportar quantidades de matérias-primas previamente estipuladas, normalmente em baixos volumes, com o intuito de reduzir *lead times*, excesso de stock e otimizar a flexibilidade da produção, lotes pequenos facilitam ajustes rápidos na linha de produção caso ocorram alterações na procura do produto.

O kanban de transporte garante que os contentores são movidos da área onde são produzidos (célula produtora) para a área onde serão utilizados (célula utilizadora). Já o kanban de produção informa quais produtos devem ser fabricados e em que quantidades, tendo em conta a procura real (Ávila et al. (2022); Andrade et al. (2023)).

Quando o material de um contentor é consumido, o trabalhador retira o kanban de transporte e leva-o até ao ponto do processo anterior para recolher o material em falta. De seguida, o kanban de transporte é fixado ao contentor que contém esse material e o kanban de produção recebe a informação que a peça foi utilizada e que, por isso, é necessário produzi-la (Sugimori et al. (1977)).

Como é possível evidenciar na Figura 2.6, de modo geral, no início do processo existe um conjunto de materiais prontos a serem consumidos. De acordo com Spearman e Zazanis (1992), cada contentor com kanbans anexados fica nos "pontos de stock" (representados por ∇) em cada estação K . Os kanbans de produção estão armazenados numa caixa (representada por \sqcup). Tanto a matéria-prima como a procura são consideradas ilimitadas, sendo apresentadas por ∇ e \sqcup a sombreado, respetivamente. De salientar que, na primeira estação terá de existir stock disponível e em todas as caixas kanbans.

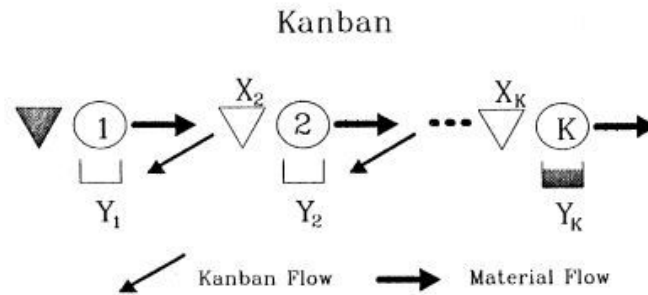


Figura 2.6: Funcionamento de um sistema Kanban (Spearman e Zazanis (1992)).

Assim, Ávila et al. (2022) consideram que os cartões possuem um papel fundamental na identificação do componente, do contêntor, das quantidades necessárias à sua produção e transporte e ainda garantem um fluxo contínuo da produção. Para satisfazer a procura durante o do prazo de entrega torna-se necessário determinar o número de kanbans utilizados no sistema, como representado na equação (2.12).

Assim, considerando que:

- D é a procura média por unidade de tempo,
- LT é o *lead time*, tempo total necessário para a finalização de um processo e ocorre desde o pedido até à expedição do mesmo,
- SS é o stock de segurança a ser utilizado,
- pSS refere-se à percentagem de stock de segurança,
- C corresponde à quantidade de veios por contêntor,
- NK trata-se do número de kanbans arredondado às unidades por excesso e com um mínimo de dois kanbans.

$$NK = \frac{D \times LT + SS}{C} \quad \text{ou} \quad NK = \frac{D \times LT}{C} + (1 + pSS) \quad (2.12)$$

Desta forma torna-se evidente que o número de kanbans é proporcional aos níveis de stock, ou seja, um aumento de NK resultará num incremento de stock e, conseqüentemente, levará ao excesso de existências. Em contrapartida, uma redução de NK , provocará a decadência nos níveis de stock contribuindo para interrupções no fluxo produtivo.

Como exemplo, considere-se a implementação de um sistema Kanban numa fábrica de motociclos de forma a gerir mais eficientemente a reposição de travões, considera-se o seguinte funcionamento do sistema Kanban:

- Cada kit de travões, composto por 2 unidades, é colocado em caixas com capacidade para 100 kits;
- Cada caixa possui um kanban de transporte anexado, sinalizando a necessidade de reposição quando o seu conteúdo for consumido;
- Assim que um determinado posto de trabalho utiliza todos os travões presentes numa caixa, o trabalhador deverá retirar o kanban de transporte e levá-lo até ao posto de trabalho de preparação de kits sinalizando, visualmente, a necessidade de preparação de uma nova caixa com 100 kits;
- Simultaneamente, o kanban de produção regista o consumo dessa caixa e autoriza a preparação de novos kits, reabastecendo-os em quantidades estritamente necessárias.

Desta forma, seguindo a abordagem *pull*, a preparação dos kits é realizada pela procura real e não por previsões, reduzindo o espaço ocupado pelo stock e mitigando a produção excessiva de travões.

Implicações no PPCP afetado pelo JIT com abordagem Kanban

Relacionando o sistema Kanban com as atividades inerentes ao PPCP, algumas etapas sofrerão implicações como demonstrado na Figura 2.7.

Segundo Ávila et al. (2022), a utilização de kanbans torna-se num sistema visual simples *pull* que permite saber quando e em que quantidades um determinado produto deve ser produzido, sendo, por isso, dispensável a fase referente ao PNOFC. A necessidade do processo de lançamento das ordens de produção é, então, suprimida, uma vez que a reposição de materiais é automática, tendo em conta a procura no mercado. No que concerne à alocação, os recursos são organizados dentro da célula produtiva ajustando-se conforme os kanbans. A sequenciação é definida através de um quadro de planeamento kanban que poderá ser ajustado rapidamente conforme a procura. Por fim, o escalonamento/calendarização também será reajustado uma vez que, não terá por base um plano produtivo futuro fixo mas sim um escalonamento adaptativo à procura real e à disponibilidade de kanbans.

O PDP do PPCP afetado pelo JIT com Kanban, também sofrerá alterações em relação ao PDP utilizado num sistema produtivo com MRP. Este deixará de ser um plano detalhado, rígido e com base em antecipações da procura para ser um plano flexível, visual e ajustado à procura real.

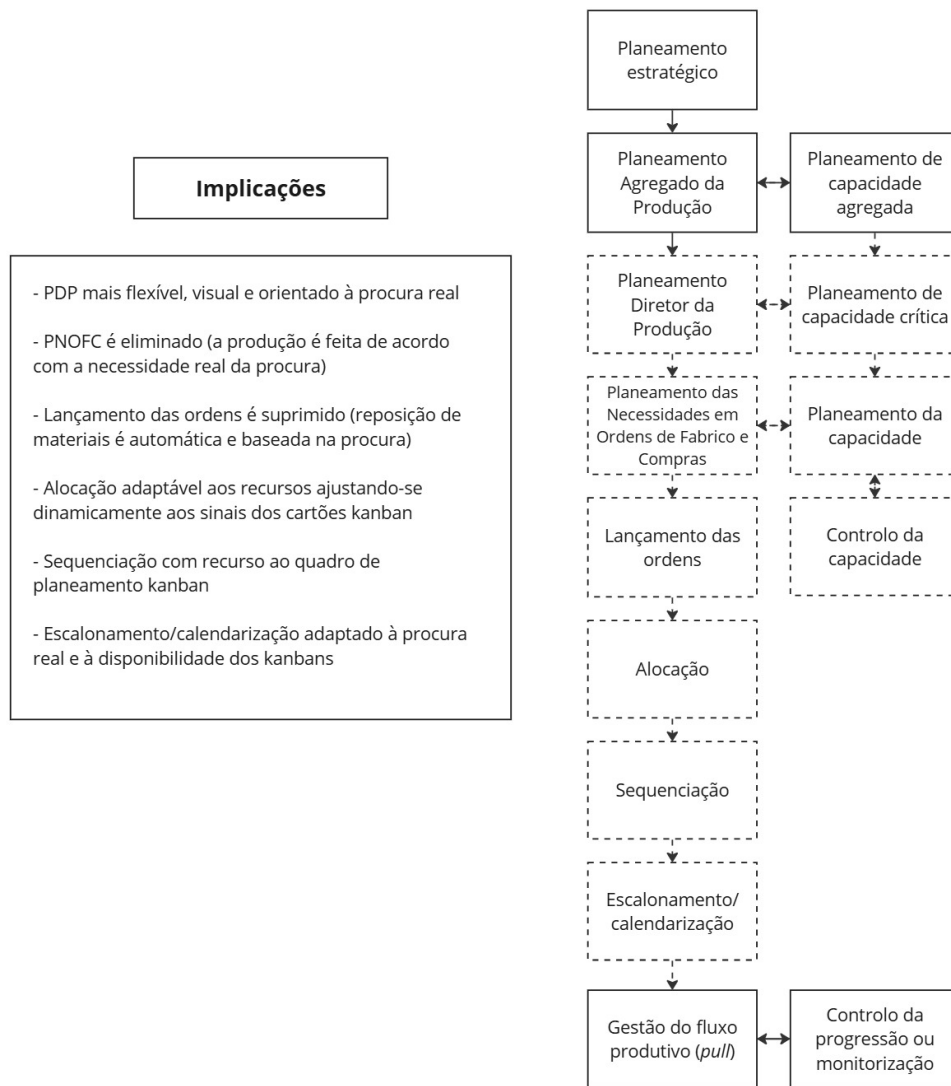


Figura 2.7: Fases do PPCP afetadas pelo JIT com Kanban (Ávila et al. (2022)).

Uma das desvantagens apresentadas por Lin et al. (2013) é o facto do clássico Kanban não ser o sistema mais apropriado quando existem oscilações na procura de produtos, irregularidades nos *lead times* nem mesmo em situações onde o abastecimento de matérias-primas pode ser um fator instável para a produção.

2.3.2 JIT com abordagem CONWIP

Desenvolvido por Spearman et al. (1990), o CONWIP é considerado um sistema *pull*, que também utiliza cartões e surgiu para superar as limitações associadas à adoção da metodologia Kanban. Contrariamente ao que acontece no Kanban onde cada cartão é alocado a um contentor, no CONWIP os cartões não são alocados a um determinado produto mas sim ao fluxo produtivo global. Este controlo garante uma resposta eficaz à procura de um determinado produto sem alongar o *lead time*,

aumentar os custos associados ou proporcionar a acumulação de stock (Framinan et al. (2003)).

De acordo com Jaegler et al. (2018), a atribuição da quantidade de peças a um determinado cartão, recorre a uma lista de *backlog* sendo da responsabilidade do controlo de produção e stock realizar a sua manutenção. Assim, os cartões são anexados aos contentores no início da linha de produção. Quando estes atingem a etapa final do processo produtivo, o cartão é então retirado e enviado novamente ao início da produção de forma a ser reutilizado tal como ilustrado na Figura 2.8. Assim, os cartões possuem a função de autorizar as ordens de produção desde que a linha esteja apta para admitir novos produtos, caso contrário, terão de aguardar no início da mesma.

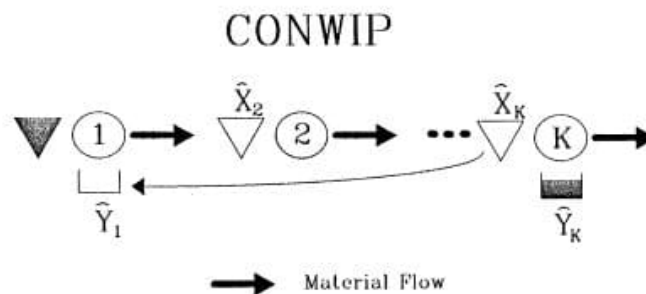


Figura 2.8: Processo produtivo do sistema CONWIP (Jaegler et al. (2018)).

A simbologia utilizada na Figura 2.8 é a mesma apresentada na análise da Figura 2.6 na Subsubsecção 2.3.1.

Dimensionar a quantidade de cartões a circular no fluxo produtivo torna-se fundamental dado que um maior número de cartões leva a um aumento do *lead time* o que comprometeria a *performance* da produção.

As empresas deparam-se com alguns desafios estratégicos relacionados com a implementação do CONWIP, nomeadamente, em aumentar o *throughput*, reduzir o WIP e o *lead time*. Se o intuito da empresa for o aumento do *throughput*, a redução do *lead time* será a solução mais eficaz pois elevaria o volume da produção enquanto reduziria custos e proporcionaria o cumprimento dos prazos de entrega. Por outro lado, se o objetivo for a redução do WIP então a redução do *lead time* seria a decisão mais adequada visto que evitar-se-ia a sua acumulação e seria possível responder, rapidamente, à procura do produto.

Por fim, caso se opte pela redução do *lead time*, a escolha mais adequada de forma a manter o fluxo produtivo constante e a redução de custos seria o aumento do *throughput* ou a redução do WIP dependendo das características do fluxo produtivo e

do próprio produto. Caso o objetivo seja aumentar *throughput*, então, será necessário assegurar que a produção esteja equilibrada com a procura, sem sobrecarregar os recursos e o fluxo produtivo.

Como exemplo, pode considerar-se a implementação do sistema CONWIP numa empresa de eletrodomésticos, o seu funcionamento do sistema será o seguinte:

- Cada linha de produção é limitada a 60 cartões correspondendo à quantidade máxima de WIP permitida em todo o processo produtivo;
- Cada cartão está associado à linha de montagem e não a um produto em específico, permitindo controlar o número total de unidades em produção;
- No início da linha encontra-se uma lista *backlog* com todas as ordens em espera. Assim, sempre que um cartão regressa e fica disponível, é-lhe atribuído o próximo produto presente nessa lista;
- A cada produto finalizado, o cartão alocado ao seu processo é retirado e enviado para o início da linha, demonstrando a necessidade de produção de uma nova unidade;
- Caso não existam cartões disponíveis no início da linha, os novos produtos deverão aguardar até que um cartão retorne.

Este controlo dinâmico e flexível sobre o WIP evita a formação de gargalos, reduz o *lead time* e assegura o contínuo fluxo produtivo tendo em conta a procura real.

Implicações no PPCP afetado pelo JIT com abordagem CONWIP

Ao contrário do que acontece no PPCP afetado pelo JIT com Kanban, onde as necessidades de materiais são automáticas e geridas totalmente de forma visual, não existindo, por isso, um planeamento formal sendo esta fase e as fases referentes ao *scheduling* eliminadas, no PPCP afetado pelo JIT com CONWIP o planeamento das necessidades não é automático, uma vez que os seus cartões não controlam cada etapa isoladamente, mas sim todo o fluxo produtivo de forma global necessitando, por isso, de coordenação.

O PDP também sofrerá alterações uma vez que será utilizado um MRP simplificado, isto é, ainda é feita uma previsão dos produtos a produzir e as, respetivas, quantidades porém, de uma forma mais flexível, orientada à gestão do WIP constante e as previsões não serão tão detalhadas face ao MRP convencional.

Todo o escalonamento e lançamento das ordens será simplificado devido à utilização do MRP simplificado, como referido anteriormente. O lançamento das ordens

só irá dar-se quando um cartão ficar disponível não existindo, por isso, grande impacto em previsões detalhadas mas sim nas disponibilidades dos cartões permitindo um fluxo constante. Já em relação à alocação contínua a ser uma fase necessária no PPCP pois o controlo do fluxo produtivo dá-se de forma global sendo essencial distribuir as operações pelos recursos disponíveis. Apesar do sistema CONWIP controlar o WIP, não define as ordens de trabalhos nem como distribuir os recursos de forma eficiente, daí a sequenciação e o escalonamento existirem mas de forma simplificada.

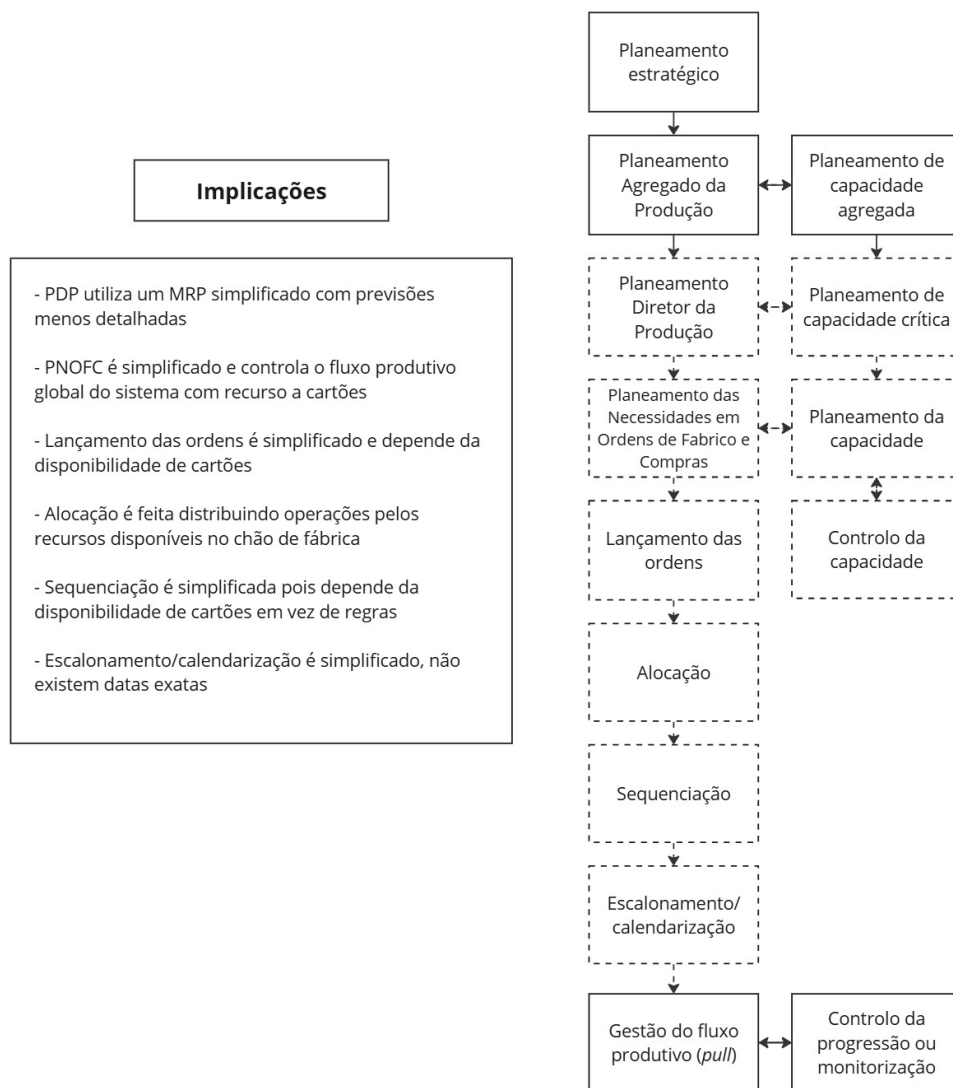


Figura 2.9: Fases do PPCP afetadas pelo JIT com CONWIP (Ávila et al. (2022)).

Porém, a eficácia do CONWIP fica comprometida quando existe uma elevada variedade de produtos que utilizem linhas produtivas, níveis de WIP ou tamanhos de lote distintos, o mesmo acontece quando existe um *lead time* instável ou até mesmo desconhecido. Outros fatores como longos períodos de *setup* e a existência

de gargalos na linha de produção são alguns exemplos que também impactam o seu correto funcionamento (Jakob Grönwall (2017)).

2.3.3 DBR/OPT

A *Teoria das Restrições* (TOC), desenvolvida por Eliyahu Goldratt, é um método com abordagem *pull*, e defende que cada tarefa deverá ser vista como um todo em vez de tratar os processos como etapas independentes. De acordo com Josefsson (2014), a DBR e o OPT serão considerados, nesta análise, como metodologias equivalentes, representando a técnica que permite controlar o fluxo produtivo na TOC. O seu objetivo é gerir, de forma eficiente, o gargalo do sistema ou os recursos com capacidades restritas sem comprometer a sua produtividade. Contrariamente ao JIT, onde é implementado numa linha de produção equilibrada, o DBR/OPT surge como uma alternativa a esta metodologia aplicando-se em ambientes irregulares e concentrando-se em mitigar restrições que impactam a eficiência do sistema (Kasemset (2011); Josefsson (2014)).

Assim, segundo Goldratt (1990), o DBR/OPT deverá focar-se em cinco passos denominados de "Cinco Passos de Foco":

“

1. Identificar as restrições do sistema.
2. Decidir como explorar as restrições do sistema.
3. Subordinar tudo o resto à decisão anterior.
4. Elevar a capacidade da(s) restrição(ões).
5. Se na etapa anterior uma restrição for eliminada, volte à etapa 1, mas não permita que a inércia cause uma restrição do sistema.

”

Şimşit et al. (2014) evidenciam que o desempenho do sistema é determinado pelas suas restrições visto que estas são analisadas como aspetos que podem ser aperfeiçoados ou reorganizados. Depois de serem identificadas, as restrições devem ser ordenadas de acordo com o seu nível de criticidade priorizando as que mais impactam no desempenho do sistema. Os restantes recursos ou processos, que não sejam considerados restrições, devem ser ajustados de forma a apoiar a restrição principal, garantindo que a mesma atinja o seu melhor desempenho. Assim, sempre que uma determinada restrição é superada, deixa de existir, permitindo que outra ocupe o seu lugar. Desta forma, recomeça-se o ciclo dos cinco passos, assegurando que o sistema atinja um desempenho sucessivamente melhor.

O DBR/OPT poderá, ainda, ser resumido a três passos equivalentes aos cinco, anteriormente, mencionados:

“

1. O que pode mudar? Identificar os problemas centrais!
2. Para o que mudar? Construir simples, soluções práticas!
3. Como causar mudança? Induzir as próprias pessoas a desenvolver estas soluções!

”

Através do método socrático, é possível concretizar o terceiro passo, pois este permite que um trabalhador, por exemplo, reconheça um problema como sendo seu, atribuindo-lhe uma maior relevância. Assim, o trabalhador é incentivado a descobrir de forma autónoma a solução, a partir de casos práticos e exemplos de sucesso, sendo possível causar a mudança no sistema.

Nesta abordagem, a restrição assume o papel de *drum* uma vez que coordena o ritmo produtivo. A *rope* é a ligação entre o gargalo e a primeira tarefa do sistema, esta permite controlar o fluxo de produtos de acordo com o *drum*, assegurando que os níveis de stock se mantêm constantes. Por fim, o stock desempenha a função de *buffer* e encontra-se, estrategicamente, a jusante do gargalo com o objetivo de reduzir a dependência do mesmo e, assim, evitar paragens na linha de produção (Figura 2.10).

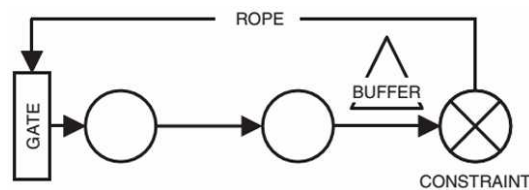


Figura 2.10: Técnica DBR/OPT (Josefsson (2014)).

Esta abordagem de gestão da produção, segundo Ávila et al. (2022), utiliza os recursos e materiais, apenas quando necessário, para atingir o *throughput* estipulado pelo recurso mais limitativo, ou seja, de menor capacidade. Assim, o DBR/OPT possui uma visão global do sistema de produção identificando e sincronizando a sua restrição principal com fluxo de trabalho dado que a mesma é quem dita o ritmo máximo de produção.

Techt (2015) apresenta um exemplo de uma empresa onde cada departamento tentava aumentar a eficiência individualmente. Desta forma a empresa estava perante o incumprimento dos prazos de entrega, cada departamento produzia não só com o intuito de atender à procura mas também para evitar tempos de inatividade, resultando em quantidades excessivas de stock. Para além disto, não existiam regras

de prioridade eficientes para os produtos sendo que, os que levavam menor tempo de conceção eram priorizados e os restantes adiados ou ignorados, resultando em atrasos nas encomendas.

A solução proposta foi a adoção do DBR/OPT onde o ritmo da produção era definido pelo *drum* tendo em conta a restrição que mais impactaria economicamente o sistema.

Considerando o seguinte exemplo de uma fábrica de mobiliário metálico, que enfrenta um estrangulamento no setor de carpintaria, de forma a otimizar o fluxo produtivo, com recurso ao DBR/OPT, definiu-se que:

- cada produto estaria a ser produzido numa determinada quantidade e durante um período de tempo previamente estipulados;
- a restrição corresponderia ao posto de trabalho da carpintaria que possui a menor capacidade comparativamente aos restantes recursos da linha de produção;
- o *buffer*, com função de proteger a restrição contra atrasos nos processos a montante, seria de 4 horas. Assim, se a operação na restrição tivesse início às 12 horas, a ordem correspondente teria de ser lançada no sistema às 8 horas, assegurando que a restrição nunca pararia.
- A *rope*, por sua vez, garante que a matéria prima está disponível no momento exato definido pelo *buffer*, neste caso, 4 horas antes da operação da restrição;

Desta forma é assegurado o funcionamento contínuo da restrição dado que a quantidade necessária de material está sempre disponível e no momento exato e ainda é evitado o excesso de stock.

Segundo Ávila et al. (2022) existem vários tipos de *buffers*, nomeadamente, os *time buffers*, stocks de segurança com função de proteger os Recursos Restritivos de Capacidade (RRC) contra possíveis tempos ociosos. Os RRC são recursos que limitam o fluxo produtivo mesmo na ausência de gargalos. Para além destes existem também os *buffers* de montagem, que garantem que peças derivadas de um RRC não fiquem à espera, durante a montagem, por peças derivadas de recursos não restritivos assegurando o contínuo fluxo produtivo. Por fim, existem ainda os *buffers* de expedição que protegem a empresa contra potenciais incumprimentos dos prazos de entrega.

Implicações no PPCP afetado pelo JIT com abordagem DBR/OPT

As fases que sofrerão implicações nesta metodologia serão o PDP, PNOFC, lançamento das ordens, alocação, sequenciação e escalonamento/calendarização tal como demonstrado na Figura 2.11

Durante a fase do PDP, o gargalo deverá ser identificado e toda a produção deverá ser organizada considerando a sua capacidade, ou seja, o *drum* irá determinar o *throughput*. O PNOFC refere-se onde serão definidos os *buffers* e as ordens de produção assegurando o contínuo fluxo produtivo no gargalo. O *rope* irá atuar durante o lançamento das ordens assegurando que apenas o necessário seja o produzido, seguindo sempre o ritmo do gargalo. A alocação também será afetada uma vez que a alocação dos recursos deverá garantir que a capacidade do gargalo produza apenas o necessário, evitando a sua saturação.

A fase do escalonamento/calendarização também será afetada uma vez que o escalonamento é definido tendo em conta o ritmo do gargalo, ou seja, a velocidade com que o gargalo consegue produzir sem interrupções, fixado pelo *drum*. Desta forma, a fase do escalonamento/calendarização é, então, suprimida e o PPCP focar-se-à no tempo necessário em que o gargalo é continuamente produtivo. Torna-se possível prever o momento em que o produto estará concluído a partir dos *buffers*, sem a dependência de previsões detalhadas.

O PDP do DBR/OPT revela-se mais adaptável, uma vez que o fluxo produtivo está, então, sincronizado com o gargalo e terá de ser continuamente ajustado em tempo real, assim, o sistema não dependerá de previsões mas sim do próprio ritmo do gargalo.

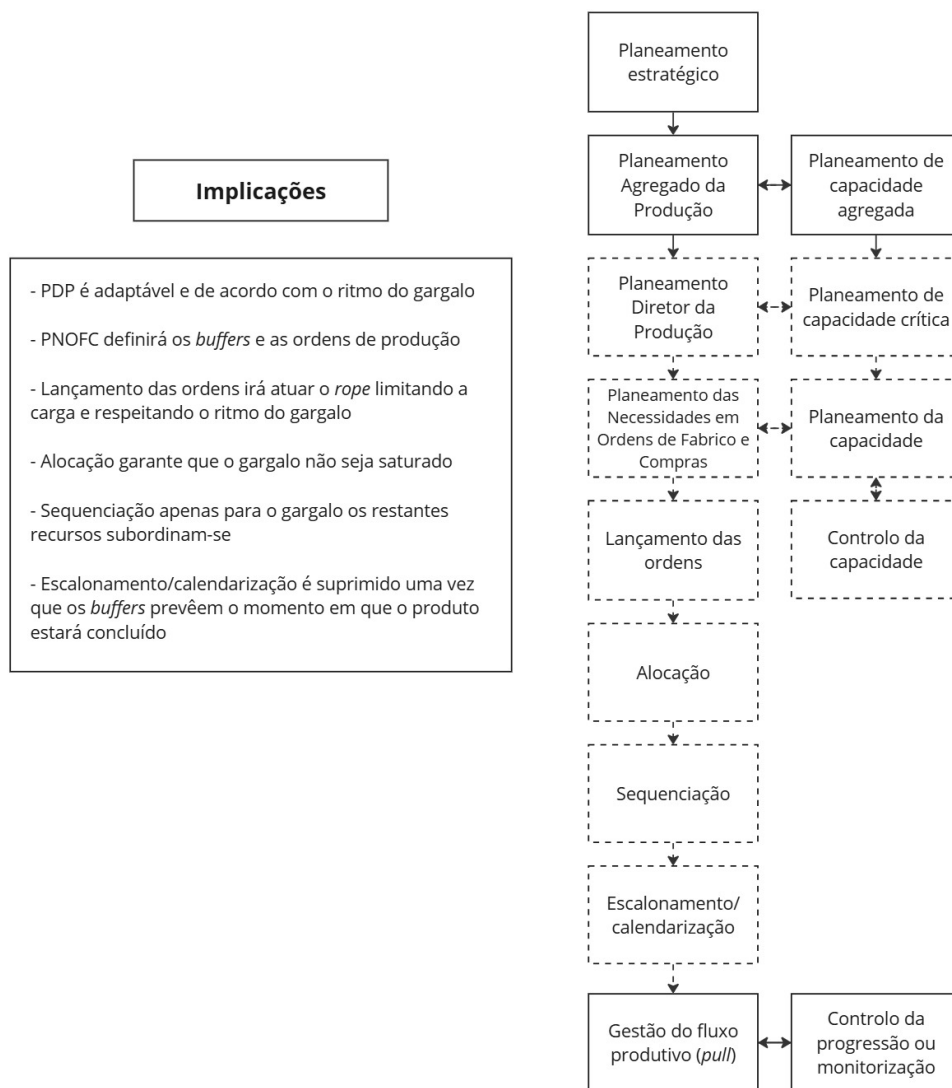


Figura 2.11: Fases de um PPCP segundo DBR/OPT (Ávila et al. (2022)).

Embora a DBR/OPT possua pontos fortes, Rahman (1998) destaca algumas limitações na sua implementação como existir o risco das empresas caírem na estagnação dos "Cinco Passos de Foco" se não aplicarem corretamente o quinto passo desse ciclo. Além disso, inicialmente o DBR/OPT foi utilizado para restrições físicas (máquinas, gargalos, entre outros) porém, com o tempo, verificou-se que políticas adotadas pelas próprias empresas também limitavam o desempenho deste sistema e ainda a dificuldade em integrar completamente o DBR/OPT com outros sistemas, como o MRP e o JIT, devido aos conflitos operacionais e aos próprios objetivos de cada metodologia.

Capítulo 3

Modelos Híbridos de Planeamento e Controlo da Produção

Consideram-se modelos híbridos de planeamento e controlo da produção os sistemas que utilizem, de forma integrada, abordagens *push* e *pull*. Estes modelos baseiam-se em previsões sem considerar o estado atual do sistema (*push*) até um certo ponto do fluxo produtivo. A partir desse ponto, passam a reagir à procura real do cliente ou das etapas a jusante do fluxo produtivo (*pull*). Consideramos os seguintes modelos híbridos: *Demand-Driven MRP* (DDMRP), *Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization* (POLCA), WLC e *Control of Balance by Card-Based Navigation* (COBACABANA) (Figura 3.1), sistemas que serão estudados, detalhadamente, ao longo do presente capítulo.

Será, ainda, efetuada uma análise das implicações das diferentes fases do PPCP, comparativamente ao PPCP segundo MRP, também serão apresentados alguns exemplos da sua implementação no espaço fabril e, por fim, serão apontadas vantagens e desvantagens do uso de cada sistema em contexto industrial.

A mesma análise de literatura realizada para os modelos convencionais foi igualmente desenvolvida mas direcionada para os modelos híbridos. O objetivo foi também compreender o trabalho científico atual sobre estes modelos, nomeadamente,

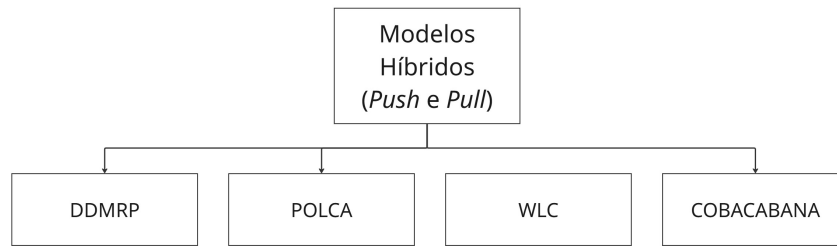


Figura 3.1: Modelos Híbridos (*Push* e *Pull*) de Planejamento e Controle da Produção.

identificar os diferentes modelos híbridos adotados no espaço fabril, perceber os critérios subjacentes à sua seleção e compreender o seu comportamento no contexto produtivo.

Assim, a pesquisa bibliográfica seguiu os mesmos parâmetros da pesquisa bibliográfica adotados à análise aos modelos convencionais incluindo a utilização da *string* de pesquisa.

Da pesquisa voltada, então, para os modelos híbridos resultou em 96 artigos: 12 são duplicados, 13 não foram publicados em revistas científicas ou em conferências, 1 está em linguagem que não o inglês (espanhol), 2 não utilizam as palavras-chave definidas, 8 não têm acesso total disponível ao artigo e 54 não possuem qualquer relação com o tema quando analisados de forma completa. Por estes motivos, foram excluídos da análise resultando na inclusão de 5 artigos, como evidenciado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Análise sistemática referente aos modelos híbridos.

Zijm (2000) descreve que no WLC, as ordens são lançadas apenas quando a carga de trabalho presente no espaço fabril se encontra abaixo de um nível predefinido. É referido que vários autores apenas consideram, neste sistema, a estabilidade dos tempos internos (tempo que a ordem lançada demora a passar no sistema produtivo) como fator que promove o controlo da carga de trabalho. Porém, propõem que os tempos externos (tempo que a ordem passa antes do seu lançamento) também deverão ser considerados. É ainda descrito que, por este motivo, tempos internos estáveis não garantem tempos externos estáveis a nível de fábrica.

De acordo com González-R et al. (2012a), o POLCA é descrito como um sistema híbrido push/pull que o seu funcionamento passa por identificar famílias de produtos com rotas semelhantes e criar pares de estações compostos por células capazes de controlar o WIP, ao limitar o seu valor máximo a partir de cartões POLCA. Este sistema foi desenvolvido para funcionar em ambientes com elevada variabilidade na procura contrariamente à ideia subjacente dos sistemas *pull*, concebidos para ambientes mais estáveis. Assim, o POLCA é apropriado para ambientes tipo MTO, *Assembly to Order* (ATO) e ETO. Porém, uma desvantagem apontada pelos autores

na implementação deste sistema é a complexidade na adaptação em ambientes com elevada variabilidade nas rotas de produção. O COBACABANA é orientado para ambientes *job shop* e utiliza cartões para o controlo do fluxo de ordens. Este sistema é dividido, pelos autores, em duas partes, uma parte referente ao lançamento das ordens e o controlo do espaço fabril e outra parte para a aceitação das ordens e a definição de prazos de entrega. Quando uma nova ordem chega ao espaço fabril, é calculado o prazo de entrega mínimo a partir da soma do tempo de produção (estimado) com o tempo de espera na *pool*. Cada cartão representa uma determinada quantidade de carga de trabalho numa estação, assim, uma ordem pode necessitar de mais do que um cartão. O sistema recorre ainda a um painel de controlo com a função de facilitar visualmente a identificação não só da quantidade de cartões disponíveis como dos que foram atribuídos a cada estação. Desta forma, é possível controlar o fluxo de ordens com características distintas, mas com a mesma rota mais facilmente, permitindo o equilíbrio da carga de trabalho nas estações críticas.

Bertolini et al. (2015) descrevem um sistema híbrido como um sistema que opera tanto em modo *push* (ou seja, programar a produção) como em modo *pull* (ou seja, autorizar a produção) e foram desenvolvidos com o objetivo de reduzir a variabilidade negativa do sistema enquanto promove o seu desempenho produtivo. São apresentadas duas razões para apresentarem melhor desempenho especialmente em ambientes que não os *Make to Stock* (MTS): a definição de um limite do WIP, o que leva a menor congestionamento e maior facilidade de controlo e o equilíbrio da carga de trabalho pelos postos de trabalho no espaço fabril, resultando em filas de espera menores necessárias à frente de cada posto para atingir um determinado nível de utilização. É referida a complexidade na implementação destes sistemas em empresas fora do ambiente MTO devido às diferenças entre a teoria e a prática. Simulações por computador não descrevem a realidade complexa do espaço fabril e não existe um método geral para avaliar o desempenho global dos sistemas específicos.

Bagni et al. (2021) avaliam a evolução e o aparecimento de novos PPCP's de 1999 até 2018. O COBACABANA é descrito como um sistema em que as ordens são avaliadas antes de serem lançadas para o espaço fabril, de forma a não exceder os limites de capacidade definidos para as estações críticas. Este sistema cria um *loop* de cartões entre o *central planner* e as estações de trabalho críticas enquanto controla os tempos de *throughput* de cada estação. O COBACABANA foi originalmente proposto para ambientes *job shop* de alta variedade, mas alguns estudos comprovaram que este apresenta um bom desempenho em ambientes *flow shop*. No entanto não existem estudos na literatura sobre a aplicação real deste sistema. Já o DDMRP baseia-se segundo quatro princípios básicos: *lead time* desacoplado, ou seja, alguns componentes do BOM são predefinidos e armazenados em stock, explosão desacoplada, para componentes mantidos em stock, os requisitos não são gerados pelo MRP tradicional mas sim pela equação de stock disponível, calculada

diariamente e com o objetivo de prever o stock futuro baseado na procura real e nas ordens de produção.

Em relação ao Fernandes et al. (2022) são identificados os fatores que impactam o desempenho dos PPCP's e apresentada uma comparação dos sistemas em diferentes ambientes industriais. Entre as comparações, o POLCA apresentou um desempenho melhor do que o CONWIP quando são testados em *Generic Flow Shop* (GFS) porém outros autores contrariam esta hipótese. O Kanban também supera o POLCA quando implementados num sistema com três estações. Em ambientes MTO, o CONWIP e o WLC reduzem o tempo total de espera no espaço fabril uma vez que, esse tempo é mais previsível mesmo que o tempo de espera na *pool* seja mais longo. Contudo, o CONWIP por não possuir capacidade de equilíbrio de carga sobre as estações, proporciona o aumento do tamanho das filas de espera nas estações sobrecarregadas, resultando em longos tempos de espera para determinados trabalhos. Já o COBACABANA supera o Kanban porque a função centralizada de aquisição de cartões permite o seu equilíbrio.

O artigo Viana et al. (2022) analisa os requisitos para os PPCP's em ambientes ETO apresentando o POLCA como exemplo de um sistema híbrido, adequado a estes ambientes. É considerado híbrido, segundo os autores, pois combina características do MRP nomeadamente na forma como é executado o lançamento das ordens para o espaço fabril, com o Kanban em termos de comunicação entre as células de produção. O POLCA é destacado como adequado para ambientes com lotes pequenos e alta variedade de produtos, contribuindo para a redução do *lead time* e fiabilidade dos prazos de entrega

É possível evidenciar, após a análise de literatura referente aos modelos híbridos, que a implementação destes modelos ainda é um processo complexo para os profissionais devido à falta de estudos práticos o que leva a uma elevada reticência na sua utilização em espaços fabris ainda que existam estudos a comprovar o seu desempenho. No capítulo seguinte serão analisados com mais detalhe os modelos híbridos de PPCP para uma melhor compreensão dos mesmos.

3.1 DDMRP

Desenvolvido por Ptak e Smith (2011), salientam que apesar das melhorias oferecidas com a adoção do MRPII existem, como já referido, determinadas limitações que precisam de ser superadas. O DDMRP surge como uma evolução do MRP, sendo um sistema capaz de associar as vantagens da implementação do MRP com princípios como o *Lean Manufacturing* e a TOC. Desta forma, torna-se possível superar limitações como as flutuações na procura, uma vez que este sistema ajusta-se, dinamicamente, a essas oscilações.

O DDMRP é, portanto, considerado uma solução otimizada e eficaz orientada pela procura (*demand-driven*), seguindo, por isso, a lógica *pull* e relacionando a disponibilidade de materiais com o seu consumo (em tempo real), considerando a BOM, seguindo, por isso, a lógica *push*. Foca-se, também, em peças críticas ou peças estrategicamente reabastecidas que têm como objetivo desencadear a produção tendo em conta a sua procura, ou seja, se existir a procura destas peças, todo o sistema produtivo é acionado sem depender apenas de previsões. Desta forma, quer o stock da empresa quer os produtos não armazenados mas são controlados com base nestas peças críticas evitando a acumulação ou rutura dos mesmos e aumentando a capacidade de resposta.

Assim, para a adoção do DDMRP a empresa deve identificar:

- onde e como posicionar o stock, garantindo a sua eficiência contra variações da procura;
- níveis de *buffer*,
- quando introduzir *buffers* dinâmicos,
- regras de planeamento orientado pela procura,
- *purchase orders*, *manufacturing orders* e *transfer orders*.

Os perfis de *buffer* ajustam-se dinamicamente e definem critérios específicos para gerir os níveis de stock, isto é, estes perfis agrupam produtos com comportamentos semelhantes e definem regras para a sua gestão. São considerados fatores como: o *lead time* (caso estes sejam longos exigem maiores quantidades em stock para evitar paragens na produção), a variabilidade da procura ou do fornecimento (sempre que a procura ou os prazos de entrega forem instáveis, é necessário, respetivamente, um *buffer* maior ou um stock de segurança), a origem do produto (produzido pela empresa, comprado ou distribuído e que influencia o momento do seu reabastecimento) e, por fim, se existem produtos que precisem de ser encomendados em conjunto (certos fornecedores exigem quantidades mínimas por encomenda, obrigando a um ajuste do *buffer*). Desta forma, os níveis de *buffer* são determinados tendo em conta estes fatores, estabelecidos pelos perfis de *buffer*.

Ao longo do tempo, a empresa sofrerá variabilidades assim, a introdução de *buffers* dinâmicos permite o ajuste automático dos *buffers* a estas alterações. As regras de planeamento orientado pela procura definem dois pilares para o planeamento otimizado do fluxo produtivo tendo em conta a relação dos níveis de stock com a procura real dos clientes, sendo eles: a utilização inteligente de sistemas modernos, permitindo o controlo em tempo real e o processamento de elevados volumes de informação, e as abordagens baseadas na procura real, que devido ao seu ajuste dinâmico do sistema à procura real do produto, viabiliza o aumento da capacidade

de resposta às encomendas e, conseqüente, mitigação de excesso ou redução de stock e ainda a gestão otimizada do stock com recurso a *buffers*. O posicionamento e tamanho dos *buffers* segue uma lógica *push* uma vez que, são definidos de acordo com as previsões da procura.

Por fim, a gestão eficaz das *purchase orders*, *manufacturing orders* e *transfer orders* alinhadas com as flutuações da procura real, torna-se imprescindível para garantir o contínuo fluxo produtivo. Assim, a adoção do DDMRP ajudou a reduzir flutuações no planeamento e na produção, priorizando produtos e ordens críticas, aumentando a eficácia do tempo de resposta a possíveis mudanças no sistema e resultou na otimização dos recursos do ambiente fabril.

Como exemplo, considere-se a implementação do sistema DDMRP numa empresa de cosméticos. Esta empresa depara-se com alguns obstáculos, nomeadamente, com o excesso de stock, rutura frequente de tampas e rótulos e ainda um elevado número de alterações no plano produtivo resultado de campanhas promocionais e de oscilações na procura.

Assim, o funcionamento do sistema será o seguinte:

- A empresa identifica as peças críticas sendo o gatilho para o início da produção;
- Os *buffers* são posicionados, por exemplo, em produtos importados com *lead time* e variabilidade elevados;
- Os produtos são agrupados em perfis tendo em conta: o *lead time*, variabilidade da procura, a sua origem e as restrições impostas pelos fornecedores;
- Em campanhas promocionais, o sistema ajusta, automaticamente, os níveis de *buffer* para produtos com picos temporários de procura. Terminadas as campanhas, os mesmos são reduzidos;
- A gestão coordenada das ordens permitirá que:
 - As *purchase orders* sejam ativadas, automaticamente, quando o sistema deteta uma rutura, ou seja, sempre que o nível de stock desce abaixo do *buffer*. Por exemplo, se o *buffer* do creme A corresponder a 100 unidades e o stock atual for de 90 unidades então o sistema gerará uma *purchase order* tendo em conta a quantidade necessária para voltar ao nível ideal;
 - As *manufacturing orders* sejam geradas de acordo com a procura real. Por exemplo, se o consumo de frascos de champô produzidos pela própria empresa ultrapassar o limite inferior do *buffer*, o sistema gerará uma *manufacturing order* de forma a repor esse produto de acordo com a procura real do mesmo e o *lead time* da empresa;
 - As *transfer orders* permitem a reposição de stock entre armazéns, linhas de produção ou em unidades fabris da própria empresa. Por exemplo, se

o armazém do Porto possui stock mas uma unidade de Lisboa sofre uma quebra de *buffer* então o sistema emite uma *transfer order* para transferir stock do Porto para Lisboa.

Implicações no PPCP afetado pelo sistema DDMRP

No que concerne ao PPCP o mesmo irá sofrer algumas alterações, nomeadamente, nas fases correspondentes ao PDP, PNOFC, lançamento das ordens e o *scheduling* como é possível evidenciar na Figura 3.3.

Como já referido, o DDMRP baseia-se na procura em tempo real, ao contrário do que acontece no MRP que se baseia em previsões. Por este motivo o PDP irá ser ajustado, tornando a produção e o abastecimento mais estratégicos, orientados pelo consumo real e controlados por *buffers* posicionados dinamicamente ao longo do fluxo produtivo.

Relativamente ao PNOFC, o mesmo não utiliza uma BOM ao longo de todo o fluxo, em vez disso, recorre a *buffers* que determinam o momento e as quantidades em que os produtos devem ser repostos. A prioridade dos prazos de entrega também é definida tendo em conta o estado do *buffer* que indica o nível de stock, ou seja, quanto mais baixo o nível de stock maior a urgência de reposição resultando num fluxo de compras mais previsível, estável e alinhado com a procura real.

O lançamento das ordens também será reajustado uma vez que, em vez de serem utilizadas datas previamente planeadas a partir do PDP como acontece no MRP, as mesmas serão lançadas quando o *buffer* sinalizar essa mesma ordem não sendo, por isso, uma fase programada com antecedência.

De forma a atender, rapidamente, à procura real dos produtos, a fase da alocação terá de tornar-se mais flexível e os recursos serão distribuídos de acordo com o estado do *buffer* garantindo que os mesmos serão usados de forma eficiente. Com a integração de *buffers* no fluxo produtivo, a sequenciação terá de ser dinâmica priorizando ordens com *buffers* em estado mais crítico. Por fim, o escalonamento/calendarização será menos complexo, comparativamente ao MRP, permitindo maior adaptabilidade a mudanças ou variações na procura real, mitigando paragens desnecessárias.

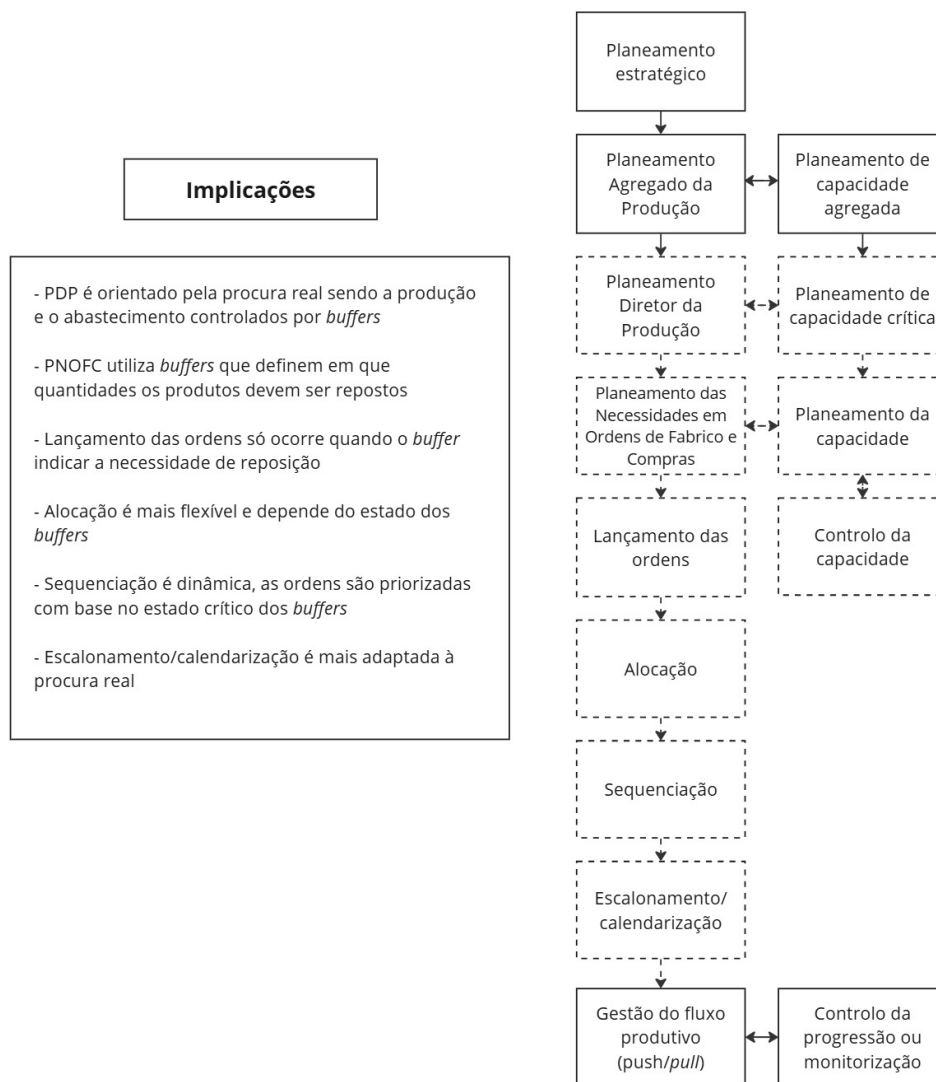


Figura 3.3: Fases de um PPCP segundo DDMRP (Ávila et al. (2022)).

Ptak e Smith (2011) referem ainda que a implementação do DDMRP num sistema exige uma mudança na mentalidade da organização, isto é, abordagens tradicionais, como as adotadas no MRP, deverão ser substituídas por abordagens orientadas para a procura. Isto poderá tornar-se um obstáculo por parte dos colaboradores uma vez que é necessário não só a aceitação de novos processos, o que implica um investimento em formação, como também uma adaptação interpessoal. Dados imprecisos ou inconstantes podem comprometer a eficácia do sistema sendo, por isso, uma desvantagem associada à implementação da metodologia DDMRP.

3.2 POLCA

O POLCA, desenvolvido por Suri (1998), integrado no *Quick Response Manufacturing* (QRM), tem como objetivo atender à procura de novos produtos, com mais

funcionalidades e elevados graus de personalização. Desta forma, torna-se imprescindível a redução dos *lead times* enquanto se mantém o desempenho do fluxo produtivo existindo, assim, a necessidade de adotar alterações, quer estruturais como estratégicas em toda a sua operação, como por exemplo: na política de compras e operações, no planeamento das capacidades e dimensionamento dos lotes entre outras. Tudo isto irá promover a velocidade no cumprimento dos prazos de entrega, reduzir os tempos de execução das tarefas, melhorar a qualidade dos produtos e ainda reduzir custos.

De acordo com Riezebos (2010), o POLCA surgiu então como forma de superar as limitações impostas na implementação dos sistemas Kanban e ConWIP nomeadamente em fluxos produtivos com uma elevada variedade de produtos por encomenda.

Segundo Thüerer et al. (2017), este sistema de planeamento e controlo da produção é considerado um sistema híbrido uma vez que combina movimentações *pull*, recorrendo ao uso de cartões que autorizam o lançamento do produto, com *push*, que envolve informações globais do sistema produtivo com base em previsões.

Como evidenciado por Thüerer et al. (2017), o controlo do fluxo produtivo dá-se com recurso a cartões, designados POLCA's, que apenas indicam que um determinado trabalho deve ser processado em dois postos de trabalho consecutivos (células), sem especificar quais, como acontece no Kanban. Desta forma, torna-se relevante decidir quais as ordens de trabalho a serem executados de forma a evitar filas excessivas num posto de trabalho. Esta decisão é tomada através da autorização de lançamento que, com base em registos de um sistema MRP, opta pelo trabalho mais atrasado de cada posto reduzindo demoras na conceção dos produtos e, consequentemente, no cumprimento de prazos de entrega. De notar que o principal objetivo do sistema POLCA é, então, regular o fluxo de trabalho com tempos de produção curtos e estáveis.

A Figura 3.4 demonstra o funcionamento de um sistema POLCA com três postos de trabalho (A, B e C) e dois pares de postos POLCA's (A-B e B-C) que indicam a origem e o destino do produto.

Considerando o seguinte exemplo da implementação do sistema POLCA numa empresa têxtil que produz roupas personalizadas sob encomenda e supondo que:

- a Estação A corresponde à fase de corte;
- a Estação B corresponde à fase de costura e acabamento;
- a Estação C corresponde à fase de embalamento e expedição.

Na Estação A:

- possui o cartão A-B disponível;
- inicia-se a fase do corte;

- quando concluída, verifica-se a capacidade disponível na Estação B bem como se o cartão A-B se encontra desocupado;
- se ambas as condições forem satisfeitas, o lote é então enviado para essa estação acompanhado pelo cartão A-B. Caso contrário, o lote permanece na Estação A até existir capacidade para a sua receção e o cartão A-B esteja disponível.

Na Estação B:

- o lote da Estação A e o cartão A-B são recebidos;
- inicia-se a fase de costura e acabamento;
- terminado o lote, verifica-se a capacidade disponível na Estação C bem como se o cartão B-C se encontra desocupado;
- se ambas as condições forem satisfeitas, o lote é então enviado para essa estação acompanhado pelo cartão B-C. Caso contrário, o lote permanece na Estação B até existir capacidade para a sua receção e o cartão B-C esteja disponível;
- nesse momento, o cartão A-B retoma à Estação A autorizando o envio de um novo lote.

Na Estação C:

- o lote da Estação B e o cartão B-C são recebidos;
- inicia-se a fase de embalagem e expedição;
- quando concluída, o lote segue para expedição ou armazenamento;
- nesse momento, o cartão B-C retoma à Estação B, autorizando a disponibilidade da capacidade das fases de embalagem e expedição;
- como corresponde à última estação, não é necessário garantir a disponibilidade da capacidade da fase seguinte ou obter um novo cartão para prosseguir.

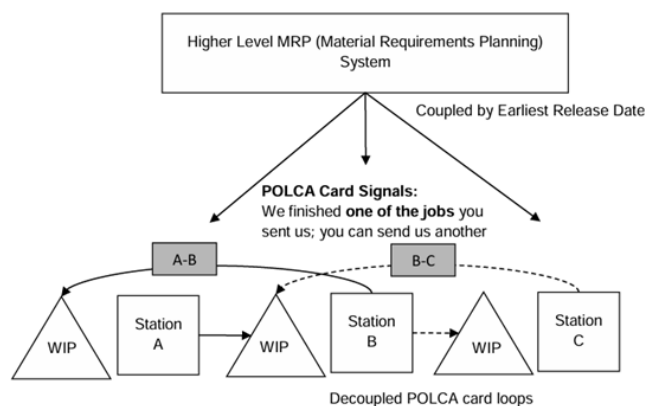


Figura 3.4: Funcionamento do POLCA (Thürer et al. (2017)).

Implicações no PPCP afetado pelo sistema POLCA

A aplicação do POLCA com o PPCP resultará na alteração de um conjunto de etapas conforme representado na Figura 3.5.

Neste sistema, o PAP, apesar de ainda utilizar a estratégia *push*, estará orientado para a capacidade do fluxo produtivo sujeita, nomeadamente, aos limites de carga e ao número de POLCA's disponíveis num dado momento. Por este motivo o planeamento da capacidade agregada também sofrerá alterações de forma a refletir estes ajustes.

O PAP deixará de se basear apenas em previsões e passará, também, a integrar uma perspetiva real e dinâmica do espaço fabril, isto é, mesmo que a previsão indique a necessidade de produção de um determinado produto, o PAP, no contexto do PPCP segundo POLCA, é responsável por garantir a coerência desta previsão com a capacidade disponível do sistema produtivo naquele momento, indicando se a ordem deverá ou não ser efetivamente produzida.

Relativamente ao PDP, este continua a indicar quais as ordens que devem ser produzidas bem como as suas quantidades porém, o mesmo não indica o momento em que as mesmas entrarão para o espaço fabril. Tal deve-se ao facto de serem utilizados POLCA's e, por isso, as ordens estão condicionadas pela sua disponibilidade e pela capacidade para a sua produção. Estas restrições refletem, conseqüentemente, a necessidade de adaptação do planeamento da capacidade crítica de forma a evitar a sobrecarga do sistema produtivo.

O lançamento das ordens também será reajustado uma vez que, ao contrário do que acontece no MRP, onde as ordens são previamente definidas e lançadas para o espaço fabril, no POLCA este lançamento está condicionado pelo WIP real do sistema, ou seja, uma ordem só poderá ser lançada após se verificar a disponibilidade de POLCA's e a capacidade de resposta. Por conseguinte, de forma a adaptar o sistema a estas restrições, a etapa da alocação não ocorrerá de forma antecipada mas sim de forma dinâmica e descentralizada. Por fim, as etapas de sequenciação e de escalonamento/calendarização também serão ajustadas uma vez que, o funcionamento do sistema POLCA, ao limitar o WIP, permite regular o fluxo de trabalho no sistema produtivo.

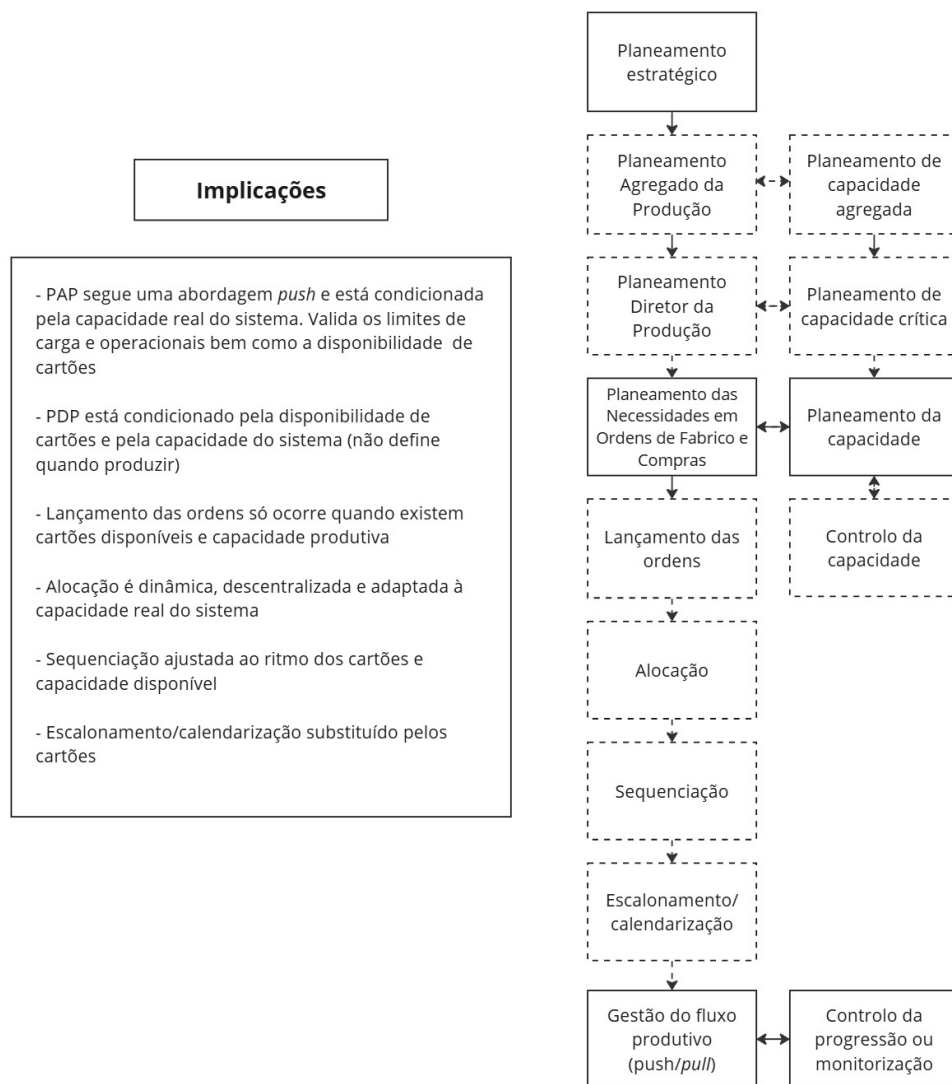


Figura 3.5: Fases de um PPCP segundo POLCA (Ávila et al. (2022)).

Fernandes e do Carmo-Silva (2006) desenvolveram, ainda, uma adaptação do sistema POLCA, mantendo os princípios do QRM, para ambientes com a procura variável e de elevada variedade de produtos: o *Generic Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization* (GPOLCA).

O GPOLCA apresenta algumas semelhanças com o sistema POLCA, como a utilização de cartões reutilizáveis para gerir tanto o lançamento das encomendas como o WIP durante a produção, além da importância de assegurar que os cartões estejam acessíveis para o lançamento das ordens. De notar que o GPOLCA baseia-se segundo numa abordagem mais *push* em comparação com o POLCA.

Porém, no GPOLCA, o WIP não está condicionado apenas pela disponibilidade correspondente à primeira etapa do fluxo produtivo, como acontece no POLCA, mas sim por todas as etapas a jusante, ou seja, nenhuma ordem poderá ser iniciada sem que exista capacidade para a receber em todas as etapas do sistema. Além disso, num

sistema GPOLCA os cartões ficam disponíveis mais rapidamente pois são retirados após a conclusão de uma ordem na segunda etapa do par de postos GPOLCA, por exemplo, num par de postos GPOLCA A-B, o cartão é, então, retirado assim que terminar a ordem no posto B. Já no sistema POLCA, os cartões permanecem no posto B até que o próximo par de POLCA's indique que existe capacidade disponível na etapa seguinte para que a ordem avance. Desta forma torna-se evidente que o POLCA prolonga o tempo de retenção do cartão e, conseqüentemente, a sua indisponibilidade.

Estas são as principais diferenças entre o POLCA e o GPOLCA, de acordo com Fernandes e do Carmo-Silva (2006), e traduzem-se num melhor desempenho global do sistema produtivo, uma vez que mitiga eventuais bloqueios e a acumulação excessiva de WIP, mesmo na presença de gargalos no fluxo produtivo.

3.3 WLC

Desenvolvido ao longo de décadas por vários investigadores, com Thürer et al. (2011) oferecendo uma análise aprofundada do WLC, esta metodologia tem como objetivo eliminar o *lead time syndrome*, ou seja, mitiga a existência de cenários onde o excesso de WIP na linha de produção resulte num aumento do *lead time*, levando, assim, desregulações nos prazos de entrega.

Ao contrário do que acontece no Kanban, no WLC as encomendas não seguem diretamente para o fluxo produtivo. Em vez disso, são encaminhadas para um espaço de espera, o *pre-shop pool*, onde aguardam até serem lançadas para o fluxo produtivo. Esta estratégia garante que o WIP permanece dentro dos limites (*workload limits*) definidos pela empresa, mantendo a eficiência da produção.

Os *workload limits* definem, então, o momento em que uma determinada ordem é ou não aceite no espaço fabril através de um conjunto de regras, sendo elas:

- cada recurso do espaço fabril (máquinas, trabalhadores, estações de trabalho etc.) possui um limite máximo de WIP que consegue suportar,
- se a entrada de uma nova ordem condicionar o limite de WIP imposto então a mesma deverá permanecer no *pre-shop pool*,
- a ordem só será lançada para o espaço fabril quando este possuir capacidade para a receber.

Para além de controlar o WIP, o WLC também é referido como um mecanismo de planeamento e controlo da produção designado de *Lancaster University Management School Approach* (LUMS Approach). Neste sistema, o WLC pode ser dividido em quatro etapas, sendo elas: *customer enquiry*, *job entry*, *job release* e *dispatching*.

Na primeira etapa, referente ao *customer enquiry*, estamos perante o momento em que o orçamento, de uma determinada encomenda, é solicitado e aceite ou rejeitado. Em caso afirmativo, segue-se para a segunda etapa, *job entry*, onde se dá a entrada da encomenda e deverá avançar seguindo certos parâmetros como dados do espaço fabril, disponibilidade de materiais, capacidade do fluxo produtivo, a própria complexidade da encomenda, o tempo que será necessário dispende para a sua conceção, entre outros. Esta análise contribui com uma visão mais realista e, consequentemente, mais fiável dos prazos de entrega e preços a propor ao cliente.

Já a etapa de *job release*, refere-se à forma como as encomendas serão lançadas para o fluxo produtivo após aguardarem no *pre-shop pool*. Assim, é feita uma comparação entre o WIP atual e os *workload limits* definidos, ou seja, se algum desses limites for ultrapassado, a encomenda deverá continuar no *pre-shop pool*.

O WIP pode ser dividido de duas formas: existe o WIP direto, que se refere aos materiais que já foram lançados para a fluxo produtivo. Por outro lado, o WIP indireto engloba os materiais que, embora ainda não tenham entrado no fluxo, estão à espera em etapas anteriores do processo. Analisando, de forma mais aprofundada, o WIP indireto, estes podem ser tratados tendo em conta duas abordagens distintas:

- Probabilística: antecipa o WIP futuro a partir de ordens a montante do fluxo produtivo. Esta estimativa provém de dados históricos que permitem estimar o tempo com que as ordens percorrem o sistema. Assim, é possível determinar a probabilidade que uma determinada ordem, a montante do processo, avançar no fluxo produtivo num determinado período de tempo;
- Agregada: antecipa o WIP futuro através da distribuição do mesmo tendo em conta a posição de cada posto de trabalho, ou seja, será atribuído mais WIP às primeiras operações e menos às mais afastadas no fluxo produtivo. Esta abordagem não depende de dados históricos e contribui para uma melhor gestão do ritmo de lançamento das encomendas para o espaço fabril.

A última etapa referente ao *dispatching* diz respeito a um conjunto de regras, utilizadas em cenários em que existam várias encomendas em espera, e que decidem a ordem de execução das mesmas no espaço fabril. A adoção do WLC mitigou o congestionamento do sistema e, por isso, o impacto destas regras também diminuiu, significativamente. Contudo, ainda se aplicam regras mais simples quando existem ordens prioritárias.

O seguinte exemplo descreve a implementação de um sistema WLC numa empresa que fabrica material de escritório personalizado sob encomenda como cadernos, capas, embalagens e blocos de notas personalizados com elevada variedade nas encomendas (quantidades, tipos de papel e formatos). A empresa possui, então, linhas de produção correspondentes à impressão, corte, encadernação e embalagem dos produtos.

Assim, o funcionamento do sistema será o seguinte:

Customer Enquiry:

- o cliente solicita um orçamento para 5000 cadernos personalizados com capa dura e o logótipo da empresa estampado;
- a empresa faz uma avaliação inicial para decidir se aceita ou rejeita o pedido de encomenda de acordo com a viabilidade do sistema e o, respetivo, histórico de capacidade;
- o orçamento é aprovado e a encomenda segue para a próxima etapa.

Job Entry:

- a encomenda é registada no sistema;
- segue-se uma análise técnica de acordo com dados do espaço fabril, a disponibilidade de materiais, capacidade do fluxo produtivo, a própria complexidade da encomenda e tempos estimados;
- a encomenda segue para o *pre-shop pool* onde aguarda até nova ordem.

Job Release:

- o sistema WLC analisa o WIP do sistema em cada linha de produção;
- segue-se uma comparação entre o WIP atual e os *workload limits* de cada recurso;
- se houver capacidade para a sua receção, a ordem segue para o posto de trabalho correspondente à impressão, caso não se verifique, permanece no *pre-shop pool*.

Nesta etapa, o sistema WLC pode prever o avanço ou bloqueio das encomendas no fluxo produtivo com base em abordagens preditivas (probabilísticas ou agregadas), como analisado anteriormente.

Dispatching:

- como WIP está controlado existem poucas encomendas em filas de espera em cada posto de trabalho;
- são aplicadas regras simples para decidir a ordem de prioridade das encomendas;
- depois de aplicadas essas regras, a encomenda é então despachada.

Assim, o WLC é considerado um modelo híbrido uma vez que, nas etapas correspondentes ao *Customer Enquiry* e ao *Job Entry*, a decisão da empresa aceitar ou não as encomendas é suportada a partir parâmetros planeados e por previsões (abordagem *push*). O *pre-shop pool* é o local de transição da abordagem *push* para uma abordagem *pull* pois as ordens aguardam na *pool* até se verificar capacidade de receção no espaço fabril (abordagem *pull*).

Implicações no PPCP afetado pelo sistema WLC

O PPCP segundo WLC, comparativamente ao PPCP segundo MRP, também irá sofrer alterações como ilustrado na Figura 3.6.

O PDP será reajustado ao PPCP segundo WLC uma vez que, mesmo que, nesta etapa, seja definido o lançamento de uma determinada ordem, o WLC irá analisar a capacidade disponível do espaço fabril, durante a etapa referente ao *job release*, de forma a avaliar se a mesma poderá ser, efetivamente, lançada. Assim, torna-se evidente que o PDP assume uma lógica *pull* na metodologia WLC, sendo então orientado para a capacidade de receção da encomenda em vez de empurrar as ordens para o sistema como acontece no MRP.

O PNOFC também sofrerá alterações, nomeadamente, com a adoção dos *workload limits* que implicam que esta etapa esteja alinhada com a capacidade real disponível do espaço fabril, uma vez que a ordem poderá ser adiada caso a encomenda exceda estes limites. As compras estão diretamente relacionadas com o *job release* dado que, os materiais só deverão ser adquiridos apenas se a encomenda for lançada para o espaço fabril, alterando, assim, o planeamento detalhado da capacidade.

O lançamento das ordens, por sua vez, já não acontecerá automaticamente como acontece no MRP, em vez disso, as ordens aguardam no *pre-shop pool* enquanto o sistema não possui capacidade para a sua receção. Já a alocação torna-se uma etapa menos complexa devido ao facto de que, no WLC, dá-se o controlo de WIP no *job release*, desta forma as ordens não são lançadas simultaneamente, tornando esta etapa mais previsível. Esta é, também, a razão pela qual a etapa referente à sequenciação se tornará mais simples, ou seja, com o WIP controlado existirão menos encomendas em filas de espera e as que existirem, serão submetidas a regras mais simples de sequenciação. Por fim, o escalonamento/calendarização também sofrerá alterações uma vez que, terá de ser reajustado de forma a respeitar os *workload limits*. Ao contrário do que acontece no MRP, onde as ordens são calendarizadas previamente e de acordo com previsões, no WLC esta etapa refletirá a capacidade real do espaço fabril assegurando a calendarização das operações apenas quando a sua execução for viável.

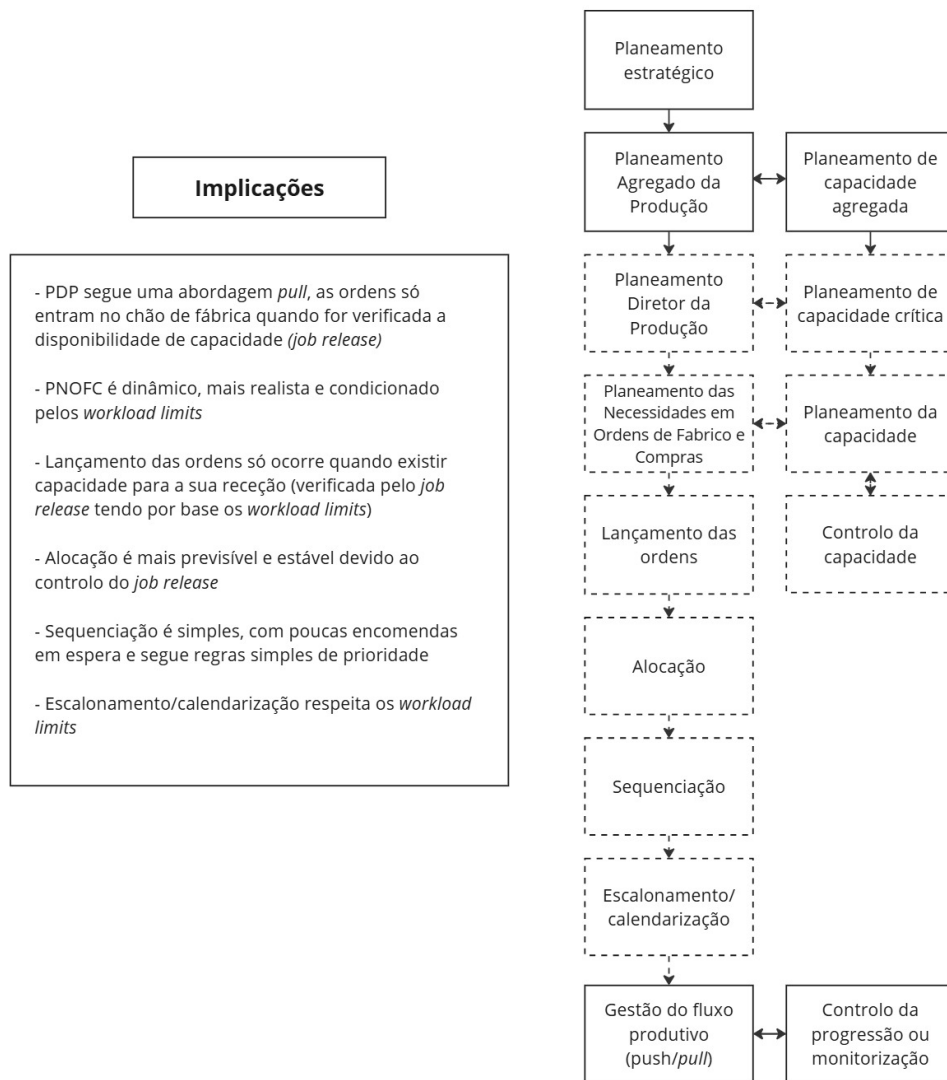


Figura 3.6: Fases de um PPCP segundo WLC (Ávila et al. (2022)).

De acordo com Thüerer et al. (2011), um dos maiores obstáculos para a integração do WLC num espaço fabril reside no fato de muitas pessoas ainda não estarem familiarizadas com essa metodologia, o que faz com que as empresas hesitem em adotá-la. Além disso, a necessidade de recolher dados de forma recorrente e em tempo real espaço fabril exige elevados investimentos tecnológicos, e a falta de pesquisas que demonstrem a eficácia do WLC a longo prazo também contribui para essa hesitação.

3.4 COBACABANA

Desenvolvido por Land (2009) e, posteriormente, explorado por Thüerer et al. (2015) a metodologia COBACABANA, baseia-se de acordo com a metodologia WLC e é estruturada tendo em conta duas decisões: a aceitação de encomendas e o lançamento de ordens de produção. Esta metodologia é considerada híbrida pois combina

uma lógica *push*, uma vez que as ordens de produção são, inicialmente, planeadas e organizadas no *pre-shop pool* com base em datas de entrega e a sua produção inicia-se com base em previsões independentemente do estado atual do sistema, com uma lógica *pull*, pois o lançamento das ordens para o espaço fabril só ocorre quando há capacidade disponível para a sua receção. Porém, o controlo é centralizado no sistema, ao contrário do que acontece no Kanban onde cada etapa é controlada individualmente, permitindo, assim, equilibrar o WIP e aumentar a eficiência operacional com recurso a cartões e tendo por base dados reais do espaço fabril.

Como apresentado na Figura 3.7, assim que as encomendas chegam ao sistema, estas terão de aguardar numa área designada *pre-shop pool*, localizada na *interface* que separa o stock das encomendas. Por este motivo, as encomendas não são lançadas imediatamente após a sua receção, sendo submetidas a determinados indicadores de desempenho. De seguida, estas são enviadas para o espaço fabril, como apresentado na Figura 3.8, onde o *central planner* com função de controlar e coordenar as novas ordens de produção, decide o seu lançamento de acordo com a capacidade de cada etapa do processo produtivo. São então utilizados cartões de lançamento em cada etapa do processo, anexados a um *Order Guidance Form* que acompanha fisicamente a ordem ao longo do fluxo produtivo.

Finalizada a ordem, o cartão volta ao *central planner*, informando que a operação foi concluída. Desta forma, é possível acompanhar o progresso das ordens de produção em todas as etapas do sistema. Cada cartão distribui de forma equilibrada o WIP pelo processo produtivo, garantindo que exista um volume adequado à sua realização.

Por fim, as restantes ordens de produção, que ficam a aguardar lançamento no *pre-shop pool*, são ordenadas de acordo com as suas datas de entrega, sendo priorizadas aquelas que possuam prazos mais próximos. Assim, é garantido que ordens de carácter mais urgente sejam alocadas e lançadas primeiro em comparação com as restantes. De notar que as datas de entrega definidas marcam o momento ideal para lançar as ordens garantindo o cumprimento dos prazos de entrega.

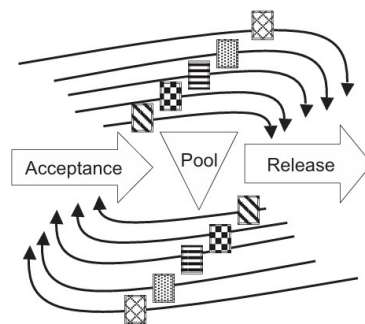


Figura 3.7: Representação do *pre-shop pool* (Land (2009)).

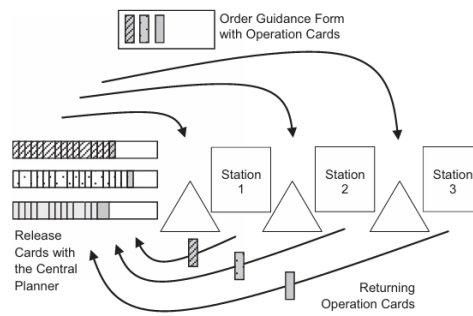


Figura 3.8: Fluxo de cartões num sistema COBACABANA (Thürer et al. (2015)).

Esta metodologia utiliza dois tipos de cartões: o cartão de operação, que acompanha a encomenda durante todo o processo indicando o momento da sua conclusão e o cartão de lançamento, responsável por apresentar o volume de trabalho do espaço fabril num *display* do *central planner*. Este último cartão não possui um tamanho fixo, uma vez que, poderá ser ajustado conforme o volume de trabalho e o *throughput* de uma determinada etapa, ou seja, é representada a capacidade produtiva de um determinado posto de trabalho (expressa em horas, por exemplo), e daí serão alocadas frações de trabalho do cartão de lançamento à ordem correspondente.

Retomando ao mesmo exemplo utilizado para descrever a implementação do sistema WLC mas, agora, adaptado ao sistema COBACABANA podemos descrever o seu funcionamento da seguinte forma:

- um cliente solicita, então, uma encomenda de 5000 cadernos personalizados com capa dura e o logótipo da empresa estampado;
- antes de entrar no espaço fabril, a encomenda aguarda no *pre-shop pool*, junto das restantes encomendas, onde será analisada e avaliada tendo em conta indicadores de desempenho e a prioridade da data de entrega;
- o *central planner* atribui um cartão de lançamento à encomenda com data de entrega mais próxima;
- a encomenda entra no espaço fabril no primeiro posto de trabalho correspondente à fase de impressão;
- nesta fase é-lhe atribuído um cartão de operação que acompanha a ordem até esta ficar concluída;
- quando terminada a operação, o cartão de lançamento retoma ao *central planner* sinalizando a disponibilidade do posto de trabalho em receber nova ordem;
- o *central planner* continua a lançar novas ordens de acordo com a disponibilidade de cartões e prioridade de datas de entrega até todo o processo estar finalizado e a encomenda for despachada.

- no momento em que a encomenda for expedida, o cartão de operação regista o processo como concluído e, eventualmente, é reutilizado ou arquivado.

Assim, é possível afirmar que o COBACABANA é, então, uma extensão da metodologia WLC com algumas semelhanças e diferenças no seu funcionamento como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Análise comparativa do COBACABANA com o WLC.

Características	WLC	COBACABANA
Funcionamento do sistema	Gestão das encomendas tendo em conta a capacidade do espaço fabril	Gestão de encomendas de forma dinâmica e visual com recurso a cartões
Tipo de controlo	Baseado em <i>workload limits</i>	Baseado em cartões (operação e lançamento)
Processamento das ordens	Através de regras simples de prioridade	Através do <i>central planner</i>
Controlo do progresso	Através do WIP	Através dos cartões que retornam ao <i>central planner</i>
Priorização das ordens	Com o controlo do WIP existirão menos encomendas em fila de espera por isso serão regras simples	Através da data de entrega dentro do <i>pre-shop pool</i>
Gestão da informação do espaço fabril	Análise histórica (probabilística ou agregada)	<i>Feedback</i> do retorno dos cartões

Implicações no PPCP afetado pelo sistema COBACABANA

O COBACABANA irá atuar nas seguintes fases: PDP, PNOFC, lançamento das ordens, alocação, sequenciação e escalonamento/calendarização.

O PDP será reajustado uma vez que, as ordens só serão lançadas pelo *central planner* quando existirem cartões disponíveis, alinhados com a capacidade real do sistema. Ao contrário do que acontece no MRP que depende apenas de previsões, no COBACABANA tal não acontece, tornando-o numa metodologia mais realista.

O PNOFC irá reajustar-se de forma semelhante ao WLC, isto é, as necessidades devem estar de acordo com a capacidade disponível porém, a mesma estará refletida na quantidade de cartões disponíveis por etapa. As compras e ordens de fabrico, por sua vez, só serão realizadas quando o espaço fabril possuir capacidade para as receber.

No COBACABANA, tal como acontece no WLC, as ordens não são, automaticamente, lançadas para o espaço fabril. Em vez disso, aguardam até que se verifique a disponibilidade de cartões. Desta forma, a etapa referente ao lançamento das ordens será reajustada dependendo, diretamente, dos cartões de lançamento.

Consequentemente, o uso de cartões no COBACABANA também irá alterar a etapa da alocação, uma vez que estes impõem limites de capacidade em cada etapa do fluxo produtivo. Desta forma, uma determinada ordem só será alocada a uma etapa se existirem cartões disponíveis para a mesma. A sequenciação, por sua vez, será controlada pelo *central planner* e não dependerá de regras de prioridade mas

sim das datas de entrega, ou seja, encomendas com tempos de entrega mais próximos serão priorizadas no lançamento. Por fim, relativamente à etapa do escalonamento/calendarização, a mesma será reajustada, uma vez que, no MRP a carga real do sistema não é considerada. Em vez disso, esta etapa é baseada em previsões resultando, frequentemente, em atrasos e no incumprimento de prazos de entrega. No COBACABANA o escalonamento/calendarização dependerá, também, da disponibilidade dos cartões, isto é, etapas mais demoradas exigem uma maior permanência dos cartões comparativamente a etapas mais rápidas e com menos carga. Desta forma, torna-se possível regular o ritmo de entrada de novas ordens no espaço fabril, ajustando-o à capacidade real de cada etapa.

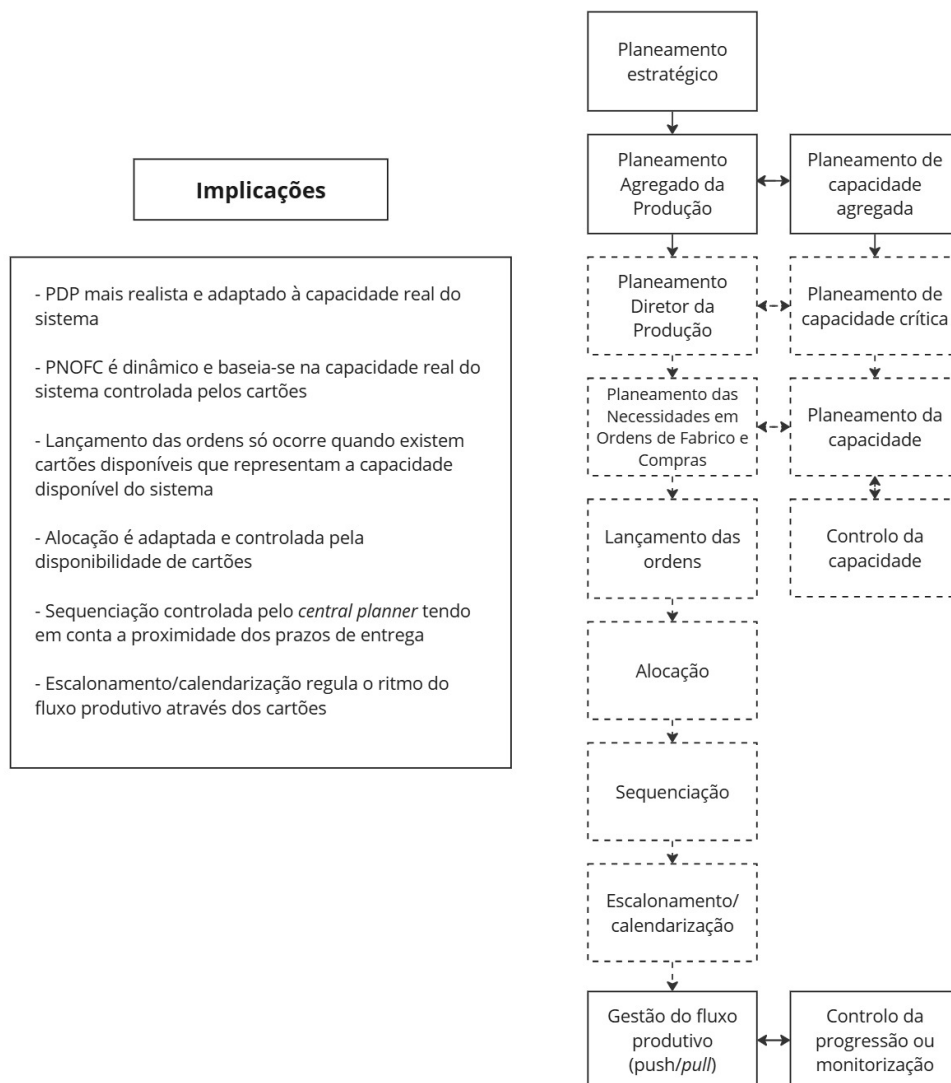


Figura 3.9: Fases de um PPCP segundo COBACABANA (Ávila et al. (2022)).

Thürer et al. (2015) indicam que esta metodologia possui algumas limitações, especialmente na dificuldade em calcular a quantidade adequada de cartões para o

seu correto funcionamento. Além disso, a sua implementação só será possível em locais com capacidades fixas e com um *design* visual do sistema apropriado. Caso a variação entre as máquinas não seja considerada, poderá haver desequilíbrios na alocação das cargas, resultando na redução da eficácia do sistema

3.5 Outros Modelos Não Classificados com Designação Própria

Na literatura, tipicamente, os modelos de planejamento e controle da produção, caracterizam-se segundo abordagens *pull* e/ou *push* como apresentado nos capítulos anteriores. Porém, surgem, ainda, casos de estudo e simulações no espaço fabril, de modelos que também seguem essas mesmas abordagens sem, no entanto, possuírem uma classificação formal sob essa metodologia, ou seja, não possuem uma designação própria não sendo, por isso, reconhecidos na literatura.

Esses modelos são, frequentemente, desenvolvidos pelas próprias empresas como resposta às necessidades e especificidades do fluxo produtivo. Ainda que não sejam modelos formalizados, demonstram-se soluções eficazes e têm como objetivo responder a, eventuais, constrangimentos ou até mesmo otimizar a eficiência do sistema.

Um exemplo da implementação deste tipo de modelos é apresentada por Osuizugbo (2020) que descreve uma metodologia inovadora no setor de construção civil na Nigéria.

O estudo tem como objetivo a gestão eficaz de recursos utilizados na construção de edifícios (materiais, mão de obra, equipamentos e toda a informação alusiva à sua produção), contribuindo para a sobrevivência das empresas neste setor principalmente aquelas que não se adaptaram a ambientes inovadores. Esta inadaptação é proveniente da negligência profissional, do escasso conhecimento de sistemas mais eficazes e do uso de mão de obra não qualificada ou profissionais sem experiência. Como resultado, dão-se atrasos ou até mesmo o abandono do projeto, dificuldades na sua interpretação, falha/colapso da obra, perdas de controle orçamentais e falta de manutenções essenciais ao projeto.

De forma a ultrapassar estas adversidades, foi proposto um novo modelo de produção que servirá de apoio à gestão da produção na construção. Este modelo é baseado nas três perspectivas da teoria *Transformation – Flow – Value* (TFV):

- *Transformation view*: esta perspectiva é considerada uma sequência de trabalhos capazes de transformar recursos em produtos finais, ou seja, transformar *inputs* em *outputs*. A produção é dividida em processos mais simples de forma reduzir o custo associado a cada um e promover a sua eficiência;

- *Flow view*: esta perspectiva vem destacar que cada processo do fluxo produtivo não deverá ser visto de forma independente mas sim como processos interligados entre si onde etapas referentes à movimentação, espera e inspeção, como não contribuem diretamente para a transformação dos produtos, representam desperdício na produção. O objetivo principal será, então, eliminar ou reduzir esse desperdício a partir de, por exemplo, redução de intervenções desnecessárias e das distâncias entre equipas, entre outros.
- *Value generation view*: esta perspectiva define que a produção deverá ser orientada para as necessidades do cliente, desde o planejamento até à entrega do projeto, uma vez que qualidade do mesmo dependerá dos requisitos impostos pelo cliente.

Assim, a teoria TFV servirá de base para o ciclo de gestão do modelo que irá repetir-se ao longo do projeto conforme as seguintes etapas:

- Gestão de valor: inicialmente as necessidades do cliente são identificadas, analisadas e planeadas assegurando que todos os requisitos propostos pelo mesmo são interpretados e implementados corretamente num plano de produção;
- Gestão de tarefas: o trabalho é dividido em tarefas mais simples e, consequentemente, de mais fácil execução de forma a garantir a correta transformação dos *inputs* em *outputs*;
- Gestão do fluxo: etapas que não agregam valor ao fluxo produtivo (desperdícios) são eliminadas traduzindo-se numa menor variabilidade de processos e maior fiabilidade operacional;
- Retorno à gestão de valor: o plano de produção é executado e os objetivos, previamente definidos pelo cliente, são avaliados para confirmar se, efetivamente, refletem o resultado final.

Este modelo é adaptável a qualquer contexto produtivo sendo eficiente não só na execução das tarefas mas também na gestão do fluxo de WIP alinhado com as necessidades do cliente. O seu funcionamento permite identificar e mitigar desperdícios e a variabilidades nos processos o que elevará a uma maior fiabilidade do sistema e, consequentemente, a entrega de valor ao cliente.

Capítulo 4

Proposta de uma *Framework* Aplicada aos Sistemas Analisados

4.1 Introdução

A elevada variedade de sistemas de PPCP presentes na literatura levou a uma maior diversidade de ambientes produtivos e, conseqüentemente, a um aumento dos desafios enfrentados pelas empresas em alcançar a eficiência esperada do espaço fabril.

Porém, as comparações entre estes sistemas nem sempre são evidentes. Assim, de forma a simplificar a sua compreensão e a apoiar a seleção adequada dos mesmos para os diferentes contextos industriais, propõe-se, no presente capítulo, uma *framework* de classificação. Esta *framework* permitirá organizar os sistemas abordados nos capítulos anteriores tendo em conta dimensões comparativas relevantes, quer do ponto de vista teórico quer do ponto de vista prático.

4.2 Dimensões de Classificação

Para superar dificuldades nas comparações ou generalizações das especificações de cada sistema, dos objetivos operacionais ou até mesmo da sua complexidade, torna-se fundamental definir dimensões de classificação para auxiliar numa tomada de

decisão mais adequada ao espaço fabril. O seu objetivo baseia-se em analisar e comparar os diferentes sistemas de planeamento e controlo da produção, tendo por base critérios em comum, presentes nos diferentes sistemas, de forma a identificar padrões, desigualdades e semelhanças, com vista à sua aplicação nos diversos contextos industriais.

As dimensões consideradas resultaram da revisão de literatura e do estudo dos elementos práticos presentes nos diferentes sistemas abordados anteriormente.

4.2.1 Tipo de Gatilho (*Trigger*) usado para iniciar a produção

Esta dimensão classifica os sistemas tendo em conta a forma como a produção é desencadeada, ou seja, define a lógica base de funcionamento de cada um dos sistemas, sendo:

- *Push*: a produção tem início tendo por base previsões da procura, planos ou agendas previamente estabelecidos. O seu objetivo é assegurar a disponibilidade de produtos antecipadamente garantindo stock suficiente para responder a uma procura futura sendo, por isso, utilizado em contextos de produção em massa e em ambientes estáveis e/ou previsíveis. “A system is said to be push if it initiates production based on forecasts or schedules, regardless of the current state of the system.” - Hopp e Spearman (1996);
- *Pull*: a produção tem início tendo por base a procura real do produto. O seu objetivo é reduzir elevados níveis de stock e desperdícios, adaptando a produção com a procura atual sendo, por isso, utilizado em ambientes com elevada variabilidade da procura ou em fluxos produtivos contínuos. “A system is pull if it initiates production as a direct response to actual demand signals.” - Hopp e Spearman (1996);
- Híbrido: é a relação das duas abordagens anteriores (abordagem *push* e abordagem *pull*) de forma a tirar o maior proveito das vantagens apresentadas por ambas. Assim, baseiam-se em previsões, sem considerar o estado atual do sistema (*push*) até um certo ponto do fluxo produtivo. A partir desse ponto, respondem conforme a procura real do cliente ou das etapas a jusante do fluxo produtivo (*pull*). “By separating the concepts of push and pull from their specific implementations, we observe that most real-world systems are actually hybrids or mixtures of push and pull.” - Hopp e Spearman (1996).

4.2.2 Geração de Ordens de Produção

A geração de ordens de produção define a criação de ordens de fabrico a partir das encomendas dos clientes ou programas de produção, ou seja, o momento e a forma como serão produzidas sendo, por isso, fundamental para qualquer sistema

de planeamento e controlo da produção. No entanto, as ordens nem sempre estão alinhadas com as necessidades das empresas devido a possíveis ajustes realizados para garantir a eficiência do processo produtivo, diminuir desperdícios e responder adequadamente à procura dos produtos.

Esta dimensão define dois tipos de geração de ordens: explícita e implícita ou visual.

- Geração Explícita de Ordens: as ordens são detalhadas sendo, posteriormente, emitido um documento que autoriza o início da produção. A ordem indica o produto e as quantidades que devem ser produzidas, a sua data de entrega, os recursos necessários para a sua conceção e todos os processos produtivos envolvidos. É utilizada em sistemas mais organizados e complexos, necessitando, por isso, de um cuidado maior no controlo do produto e na sua documentação;
- Geração Implícita ou Visual de Ordens: as ordens não carecem de um documento que permita o início da produção. Em vez disso, são empregados cartões, painéis, etiquetas ou sinalizadores, que emitem sinais de consumo, indicando a necessidade de produzir ou reabastecer um certo produto. É utilizada em sistemas produtivos com produção personalizada e flexível devido à sua simplicidade.

4.2.3 Lançamento das Ordens na Produção (*Input Control*)

O momento em que as ordens dão entrada no espaço fabril refere-se à dimensão do lançamento das ordens de produção. Esta entrada irá impactar, diretamente, ao nível da carga do sistema, no cumprimento de prazos de entrega ou até na estabilidade do fluxo produtivo.

O lançamento irá variar de acordo o modelo de planeamento e controlo de produção adotado pela empresa e poderá tomar as seguintes formas:

- Lançamento Baseado em WIP: a ordem será lançada para o espaço fabril dependendo da quantidade de WIP presente no sistema. É, então, definido um limite máximo de ordens admitidas no sistema sendo interrompido o lançamento de novas ordens sempre que este for ultrapassado, evitando a sobrecarga do sistema. Este lançamento é utilizado em sistemas com uma elevada variedade de produtos com prazos de entrega reduzidos que seja necessária uma resposta mais eficaz perante oscilações na procura e eventuais constrangimentos;
- Lançamento Baseado na Carga: a ordem irá ser lançada para o espaço fabril dependendo da capacidade disponível nos postos de trabalho do sistema nesse momento, ou seja, só serão lançadas novas ordens se os recursos conseguirem, efetivamente, processá-las. Assim, é comparado, regularmente, o nível de carga

(expresso em unidades de tempo, por exemplo horas) com a carga atribuída ao mesmo a fim de decidir se deverá ou não avançar com o lançamento. É utilizado em sistemas com capacidade produtiva variável;

- Lançamento Baseado em Datas: a ordem irá ser lançada para o espaço fabril tendo em conta um calendário previamente definido, ou seja, a partir de datas planeadas para o início de cada ordem. Estas datas são definidas por um sistema de planeamento regressivo (*backward scheduling*, assim, partindo da data de entrega estabelecida e recuando no tempo, é determinada a data de início de produção. É, tipicamente, utilizado em sistemas com produção por encomenda e *lead times* mais longos.
- Lançamento Híbrido: combina dois ou mais tipos de lançamento de ordens a fim de obter uma adaptabilidade maior aos diferentes contextos produtivos e, conseqüentemente, um maior controlo sobre o fluxo produtivo. É, por isso, mais utilizada em sistemas mais complexos onde aplicar um tipo de lançamento de ordens se tornará insuficiente, ou seja, poderá aplicar-se um lançamento baseado em datas para um determinado tipo de produtos e um lançamento baseado em WIP para outro tipo, dependendo de qual se adegue melhor a cada contexto, sem comprometer a eficiência do sistema.

4.2.4 Despacho/Priorização das Ordens no Espaço Fabril

O despacho/priorização das ordens no espaço fabril refere-se à forma como as ordens serão sequenciadas no espaço fabril, ou seja, quando existem várias ordens disponíveis para serem processadas num determinado recurso, é fundamental decidir a prioridade de uma ordem perante as restantes em espera.

Assim, a forma como a sequenciação será realizada irá impactar fatores como o *lead time*, o cumprimento dos prazos de entrega e se a execução de uma determinada ordem será mais adequada, face ao desempenho global do sistema, quando priorizada em relação a outra. Além disso, também dependerá dos objetivos da empresa, do tipo de sistema adotado e de, eventuais, restrições operacionais.

Segundo BLACKSTONE et al. (1982) a priorização pode ser feita com base em regras simples e de fácil aplicação, por exemplo: *First In, First Out* (FIFO), *First In System, First Served* (FISFS), *Last In, First Out* (LIFO), *Shortest Processing Time* (SPT), *Earliest Due Date* (EDD), *Longest Processing Date* (LPT), entre outras.

Existe, porém, outros tipos de priorizações de ordens que não utilizam estas regras, mas sim sinais, permitindo aos operados identificar diretamente quais as ordens a priorizar, a partir da cor ou pela posição no fluxo produtivo, sendo elas:

- *Buffers* coloridos: os *buffers* possuem cores distintas e, dependendo da cor atribuída, é possível identificar o estado atual ou urgência das ordens de reposição no fluxo produtivo;
- *Heijunka box*: baseia-se num quadro visual onde se identifica a prioridade de uma determinada ordem (produto) a partir da sua posição na sequência representada ao longo do quadro.

4.2.5 Foco no controlo (Pontos de controlo)

O foco no controlo (pontos de controlo) refere-se ao local onde o controlo do sistema produtivo é realizado, ou seja, o ponto físico, localizado no espaço fabril, onde são tomadas decisões sobre autorização, lançamento ou ritmo produtivo. Esta dimensão pode variar conforme o modelo adotado pela empresa, afetando diretamente o nível de descentralização do sistema e sua capacidade em responder a flutuações na procura ou na disponibilidade de recursos.

Assim, esta dimensão pode assumir os seguintes níveis:

- Posto de trabalho: as decisões operacionais são tomadas, por trabalhadores ou equipas, diretamente no espaço fabril, detendo, por isso, uma elevada autonomia operacional. Assim, o *trigger* é acionado localmente tendo em conta as condições visíveis do sistema produtivo com recurso a cartões físicos, sinais visuais e disponibilidade de espaço ou de materiais no posto a jusante;
- Sistema: as decisões operacionais são tomadas por algoritmos, regras ou políticas definidas num sistema de informação que auxilia o planeamento e controlo do espaço fabril;
- *Buffers* críticos: as decisões operacionais são tomadas tendo em conta os níveis de stock em pontos específicos do ciclo produtivo, assim, o sistema recorre a *buffers*, estrategicamente posicionados, para regular o fluxo produtivo.

4.2.6 Tipo de Revisão

O tipo de revisão refere-se à frequência com que as decisões sobre produção ou reposição são efetuadas. Essa escolha afeta, diretamente, a capacidade de resposta do sistema produtivo perante mudanças na procura, disponibilidade de matérias-primas ou até mesmo nos tempos de processamento.

Assim, o tipo de revisão impactará na rapidez da resposta do sistema diante variações o que, conseqüentemente, influenciará a estabilidade operacional. Sistemas que requerem revisões mais frequentes são mais sensíveis a alterações no ambiente produtivo, enquanto ambientes com revisões menos regulares tendem a ser mais estáveis e previsíveis

Definiram-se dois tipos de revisão, sendo eles:

- Revisão periódica: a decisão de produção ou revisão ocorre em períodos de tempo fixos e previamente definidos;
- Revisão contínua: a decisão de produção ou revisão é desencadeada sempre que ocorre um evento significativo para o sistema (stock).

4.2.7 Integração com Sistemas de Informação

A dimensão referente à integração com sistemas de informação refere-se à forma como as diferentes metodologias se articulam com os sistemas de apoio à gestão como o ERP, por exemplo, *software* utilizado pelas empresas para gerir processos e operações de negócios.

Quanto mais facilmente estas metodologias se integrarem nos diversos sistemas de informação, maior será a capacidade de coordenação das operações, a visibilidade do estado atual do fluxo produtivo o que levará a uma tomada de decisão mais informada e alinhada com os objetivos da empresa.

Assim, esta integração pode assumir os seguintes níveis:

- Baixa ou Nenhuma Integração: o sistema opera, exclusivamente, de forma manual ou visual não sendo necessário um *software* de apoio à gestão;
- Integração Parcial: utiliza sistemas de apoio à gestão porém ainda são necessárias ações humanas;
- Alta Integração: o sistema opera, exclusivamente, com recurso a sistemas conectados e automatizados, que recolhem dados em tempo real do espaço fabril, e tomam decisões com base em algoritmos.

4.2.8 Flexibilidade e Facilidade no Reajuste do Planeamento

A facilidade no reajuste do planeamento refere-se à capacidade do sistema em adaptar-se a, eventuais, constrangimentos, ou seja, é a dimensão que demonstra a forma como a metodologia utilizada no espaço fabril responde quando deparada com *lead time* longos, mudanças imprevistas na procura, atrasos na produção, avarias dos recursos, entre outros.

Assim, sistemas mais flexíveis demonstram-se mais eficazes e, conseqüentemente, possuem uma maior facilidade em se ajustarem. Estes podem classificar-se em:

- Baixa facilidade: sistemas que se baseiam em planeamentos rígidos e que a sua alteração implique ações humanas ou um novo processamento do sistema;
- Média facilidade: sistemas que possibilitam ajustes pontuais como, por exemplo, a alteração de ordens com base em *buffers*;

- Alta facilidade: o sistema consegue responder, dinamicamente, a alterações no espaço fabril com recurso a sinais presentes no próprio fluxo produtivo.

4.2.9 Tipologia de produção

Esta dimensão refere-se à forma como os processos produtivos são organizados no espaço fabril, isto é, a forma como os materiais se movimentam entre os postos de trabalho. Estes podem classificar-se em (Stevenson et al. (2005)):

- *Flow shop*: sistema produtivo onde os materiais seguem uma única direção específica, ou seja, um percurso fixo. Assim o fluxo produtivo é linear, repetitivo e os processos produtivos e materiais são padronizados;
- *Job shop*: sistema produtivo onde os materiais que iniciam e terminam em qualquer estação. Assim o fluxo produtivo é variável, com alta flexibilidade e personalização de materiais. Os materiais avançam no espaço fabril de acordo com as necessidades do cliente;
- Híbrido: sistema produtivo que combina as características do *flow shop* com as do *job shop*. Assim, os materiais podem seguir percursos diferentes no espaço fabril mas tendo sempre em consideração a direção predominante do fluxo produtivo, promovendo quer a padronização quer a flexibilidade de materiais.

4.2.10 *Framework* aplicada aos sistemas analisados

Conforme a revisão de literatura e os modelos, previamente, identificados, propõe-se, no presente subcapítulo, uma *framework* com o objetivo de classificar cada sistema de planeamento e controlo da produção com base nas dimensões analisadas.

Classificação do MRP

- *Trigger*: funciona a partir de previsões da procura e de um plano mestre, atuando de forma antecipada (*push*);
- Geração explícita de ordens: ordens são formalizadas e estruturadas (são especificadas informações como a data de início e fim, recursos necessários, etc.), tendo em conta as necessidades líquidas, o *lote size*, o *lead time*, o BOM, etc.
- Lançamento das ordens baseado em datas: as ordens são planeadas e lançadas tendo em conta um planeamento regressivo (*backward scheduling*) não sendo, por isso, um processo automático;
- Despacho/priorização: apesar de seguir um plano fixo e sequencial com recurso a sistemas, o MRP não define formalmente a forma de despacho das ordens para o espaço fabril;

- Foco no controlo localizado no sistema: todas as decisões de produção são tomadas pelo próprio sistema tendo por base previsões e o BOM;
- Revisão periódica: as decisões são tomadas tendo em conta previsões e o BOM em intervalos de tempo fixos;
- Integração alta com sistemas de informação: é um sistema desenvolvido para ser integrado com sistemas como o ERP de forma a coordenar dados como compras, stock, produção, oferecendo uma visão mais abrangente do planeamento;
- Facilidade baixa no ajuste do planeamento: por não ser um sistema baseado em previsões e menos na procura possui baixa adaptabilidade a variações. Assim, o seu ajuste implicaria uma atualização de todo o plano (abrangendo todos os parâmetros alusivos ao MRP), o que poderia gerar instabilidade no seu planeamento e comprometer a fiabilidade do sistema;
- Tipologia de produção do tipo *flow shop*: dada a sua abordagem *push* baseada em previsões, a sequenciação fixa das operações, a existência de uma BOM previamente definida e a direção padronizada do fluxo de materiais sendo mais adequado em processo estáveis e repetitivos.

Classificação dos Modelos de Reposição Contínua de Stock

- *Trigger*: funciona quando as ordens são lançadas antecipadamente, empurrando os materiais para o sistema (*push*);
- Geração explícita de ordens: quando atingido o ROP, é gerada uma ordem com informações como qual o produto a repor, a quantidade fixa a encomendar e o momento em que deve ser feita a encomenda, até ser atingido o nível de reposição de stock previamente definido;
- Lançamento das ordens baseado em WIP: o lançamento da ordem ocorre de forma imediata (*immediate release*), ou seja, não existe um controlo adicional a este nível;
- Despacho/priorização: o sistema baseia-se nos níveis de stock ou seja, não define formalmente a forma de despacho das ordens. A reposição ocorre apenas quando necessário em resposta a um sinal que indica a rutura do nível de stock;
- Foco no controlo regulado por *inventory buffers*: a reposição de stock ocorre sempre que o nível de stock atinge o ROP como tal, o seu controlo ocorre continuamente e de forma permanente;

- Revisão contínua: o stock é monitorizado continuamente sendo repostado quando ultrapassar o ROP;
- Integração alta com sistemas de informação: o sistema pode ser implementado de forma manual ou com recurso a sistemas de informação utilizados para suportar o seu funcionamento, nomeadamente na monitorização dos níveis de stock;
- Facilidade alta no ajuste do planeamento: o sistema adapta-se facilmente a flutuações na procura, uma vez que os níveis de stock são, constantemente, controlados assegurando que não ultrapasse o ROP por isso, não é necessário a reprogramação global do planeamento;
- Tipologia de produção do tipo *flow shop*: dada a utilização de *buffers* de forma a regular o nível de stock, isto é, um controlo contínuo e o recurso a regras simples e pré-definidas é, por isso, um modelo mais adequado em ambientes padronizados com fluxo linear de materiais.

Classificação dos Modelos de Reposição Periódica de Stock

- *Trigger*: funciona a partir de intervalos de tempo fixos independentemente do consumo real (*push*);
- Geração explícita de ordens: o sistema gera uma ordem de reposição do stock até ao nível máximo sendo que poderá variar conforme o stock disponível no momento da revisão;
- Lançamento das ordens baseado em datas: os níveis de stock são revistos em intervalos de tempo fixos e regulares e, por isso, as ordens são lançadas segundo datas previamente definidas;
- Despacho/priorização: o sistema baseia-se na reposição dos níveis de stock em intervalos de tempo fixos, ou seja, a prioridade está na reposição de stock e não na priorização das ordens;
- Foco no controlo localizado no sistema: a reposição de stock ocorre em intervalos de tempo previamente definidos pelo sistema adotado pela empresa;
- Revisão periódica: os níveis de stock são controlados em intervalos de tempo fixos e previamente definidos;

- Integração parcial com sistemas de informação: a necessidade de um controlo constante através de sistemas de informação não é fundamental visto que os níveis de stock são revistos em intervalos de tempo fixos porém, poderão recorrer a estes para controlar o calendário de revisões de forma automática;
- Facilidade média no ajuste do planeamento: como os parâmetros do sistema são estipulados segundo um calendário fixo, flutuações que surjam poderão comprometer as datas definidas sendo, por isso, necessário definir novas datas, ou seja, novos intervalos de revisão, entre outros;
- Tipologia de produção do tipo *job shop*: dada a revisão periódica, em intervalos de tempo fixos, garantindo uma maior estabilidade do fluxo produtivo e tornando a produção menos previsível e mais personalizada.

Classificação do Kanban

- *Trigger*: funciona a partir de sinais reais de consumo, assim que se dá o consumo de um produto, o cartão é dissociado do produto e retoma ao quadro de cartões sinalizando a necessidade de reposição (*pull*);
- Geração implícita ou visual de ordens: as ordens utilizam um sinal visual (cartão) indicando a necessidade de produção e/ou reposição de stock;
- Lançamento das ordens baseado em WIP: a quantidade de cartões a circular no fluxo produtivo limita a quantidade de produtos e como tal a produção em curso, assegurando o lançamento de novas ordens apenas se existirem cartões disponíveis;
- Despacho/priorização: podem seguir regras simples (FIFO) ou a partir da *Heijunka boxes* podendo ser usados kanbans físicos ou kanbans digitais;
- Foco no controlo localizado no posto de trabalho: as decisões operacionais são tomadas tendo em conta cartões físicos que indicam ao trabalhador ou às equipas a autorização de produção ou movimentação de materiais;
- Revisão contínua: o início da produção ocorre em tempo real de acordo com a movimentação de cartões;
- Integração parcial com sistemas de informação: o Kanban funciona de forma visual, o que não exige o uso de sistemas de informação porém, algumas variantes já demonstram uma elevada integração com esses sistemas. Assim, a sua integração dependerá da variante adotada no espaço fabril;

- Facilidade alta no ajuste do planeamento: como o sistema responde diretamente ao consumo real também reage de forma dinâmica a oscilações, uma vez que aumentar ou diminuir a quantidade de cartões em curso permite um rápido ajuste e, conseqüentemente, controlo do sistema;
- Tipologia de produção do tipo *flow shop*: dada a utilização de cartões para controlar o WIP é mais adequado em sistemas produtivos estáveis e repetíveis garantindo que o fluxo produtivo segue uma direção fixa de forma a ser possível adotar este controlo visual.

Classificação do CONWIP

- *Trigger*: funciona a partir de sinais reais de consumo ao nível sistema (*pull*). Sempre que uma ordem (trabalho) é concluída é disparada uma nova ordem;
- Geração implícita ou visual de ordens: as ordens utilizam sinais visuais (cartões) que sinalizam a entrada de novas ordens tendo em conta o consumo real do sistema;
- Lançamento das ordens baseado em WIP: a quantidade de cartões a circular no fluxo produtivo limita a produção e assegura o lançamento de novas ordens apenas quando uma ordem é concluída;
- Despacho/priorização: podem seguir regras simples de priorização (FISFS) ou a partir de *Heijunka box*, porém o sistema não possui uma regra geral sendo utilizada a que melhor se adaptar;
- Foco no controlo localizado no sistema: as decisões operacionais são tomadas tendo em conta a capacidade total do sistema sendo controladas por um mecanismo central que regula a sua entrada;
- Revisão contínua: as ordens só serão lançadas para o espaço fabril quando outras estiverem concluídas o que exige um controlo contínuo do WIP;
- Integração parcial com sistemas de informação: o CONWIP funciona de forma visual não exigindo integração com sistemas de informação porém, poderá acontecer dependendo da complexidade do espaço fabril;
- Facilidade média no ajuste do planeamento: o sistema é dinâmico pois ajusta-se automaticamente a, eventuais, oscilações a partir da quantidade de cartões em curso. Assim, torna-se fundamental o ajuste dos níveis de WIP e da quantidade de cartões a circular no espaço fabril de forma a lidar eficazmente com estas variações;

- Tipologia de produção do tipo *flow shop*: dado o controlo global do WIP e a sequenciação das ordens ser conhecida, torna-se mais adequado em ambientes estáveis e com materiais padronizados de forma a garantir a previsibilidade do fluxo de materiais.

Classificação do DBR/OPT

- *Trigger*: funciona tendo em conta o ritmo da restrição, ou seja, esta subordinado à capacidade da mesma (*pull*);
- Geração explícita de ordens: as ordens possuem carácter formal baseando-se num plano de produção e ajustadas tendo em conta o ritmo da restrição;
- Lançamento das ordens baseado em datas: as ordens são planeadas e lançadas seguindo a lógica da técnica DBR que define o ritmo da produção tendo em conta a restrição. A data de lançamento é, previamente, definida de forma a chegar, no momento correto, isto é, a data para o lançamento é definida tendo em conta o momento em que a ordem deverá passar pela restrição;
- Despacho/priorização: são utilizados *buffers* coloridos indicando o grau de urgência de cada ordem conforme a proximidade à restrição, assegurando que a mesma nunca fique inativa;
- Foco no controlo localizado no sistema: as decisões operacionais são tomadas tendo em conta a capacidade da restrição previamente definida, sendo que o fluxo produtivo será controlado por um mecanismo que assegura o lançamento das ordens com base no ritmo da restrição;
- Revisão contínua: o sistema reage de forma contínua ao ritmo imposto pela restrição;
- Integração parcial com sistemas de informação: originalmente fez parte da metodologia OPT e, dependendo do tipo de contexto industrial, poderá ser integrado com sistemas como o ERP. Por exemplo, em contextos industriais mais simples a gestão da restrição pode dar-se manualmente ou com recurso a sinais físicos mas em contextos industriais mais complexos a sua integração com sistemas de informação torna-se útil pois controla, em tempo real, o estado da restrição;
- Facilidade média no ajuste do planeamento: para ajustar o sistema perante, eventuais, oscilações é apenas necessário ajustar o tamanho dos *buffers* ou reordenar a priorização das ordens tendo em conta o estado da restrição;

- Tipologia de produção do tipo híbrido: apesar do foco do modelo estar na restrição, este adapta-se eficazmente quer em fluxos com elevada variabilidade quer em fluxos lineares, sendo por isso, um modelo flexível. Denotar que, para garantir esta flexibilidade, o DBR/OPT deverá definir e controlar adequadamente a restrição.

Classificação do DDMRP

- *Trigger: pull* funciona a partir de sinais reais de consumo a partir dos *buffer* e *push* pois o posicionamento dos *buffers* é definido antecipadamente (híbrido);
- Geração explícita de ordens: as ordens são geradas pelo sistema assim que o stock atinge ou cai para a zona amarela (*Top Of Yellow (TOY)*) dos *buffers*;
- Lançamento das ordens baseado em datas: o sistema baseia-se em parâmetros como o *lead time* e a posição dos *buffers* no fluxo produtivo para definir o momento em que a ordem deverá ser lançada. Esse momento está diretamente relacionado com o consumo real e, eventuais, flutuações do mesmo, sendo calculado, previamente, o momento em que o stock atingirá o limite inferior do *buffer*;
- Despacho/priorização: para além dos níveis de stock e o estado dos *buffers*, associados às restrições, que permitem identificar a urgência de uma ordem, este sistema também pode recorrer ao uso de *bufferrs* coloridos para facilitar a perceção visual para demonstrar o risco de rutura de stock;
- Foco no controlo regulado por *inventory buffers*: s decisões operacionais são tomadas tendo em conta *buffers* posicionados estrategicamente e que funcionam como pontos de desacoplamento das diversas fases do processo produtivo;
- Revisão contínua: as decisões de produção ou reposição são tomadas de acordo com o estado dos *buffers*, controlados continuamente;
- Integração alta com sistemas de informação: a dependência do sistema com limites de *buffers* exige um controlo, constante, dos níveis de stock, consumos reais dos produtos, *lead time* e perfis de *buffer*, por isso, a integração com sistemas de informação é fundamental oferecendo um controlo e análise de dados em tempo real;
- Facilidade alta no ajuste do planeamento: a utilização de *buffers* torna o sistema dinâmico e responsivo a imprevistos e oscilações não sendo necessário o planeamento constante do sistema sempre que deparado com estas variações. Os *buffers* regulam-se, continuamente, ao sistema reduzindo a necessidade de intervenções frequentes;

- Tipologia de produção do tipo híbrido: dada à abordagem híbrida utilizada por este modelo, o DDMRP também se adapta a ambientes com variabilidade desde que o sistema esteja organizado corretamente no espaço fabril tornando-se, por isso, um modelo adequado quer em processos com fluxos lineares como com diferentes percursos.

Classificação do POLCA

- *Trigger*: funciona a partir do planeamento centralizado das ordens, ou seja, *push*, e *pull* na dependência de cartões disponíveis e capacidade de receção nas estações a jusante em receber ordens para dar-se o avanço do fluxo produtivo (híbrido);
- Geração explícita de ordens: as ordens são geradas formalmente a partir de um planeamento centralizado onde é, previamente, definido, todas as informações das, respetivas, ordens e, posteriormente, controladas por cartões;
- Lançamento das ordens baseado em WIP: o seu lançamento só ocorre quando a estação a jusante possuir capacidade para a receção da ordem e se existirem disponíveis cartões POLCA para acompanhar o processo assegurando que o WIP não é ultrapassado;
- Despacho/priorização: baseado em datas e regras simples de priorização (EDD), ou seja, priorizam-se ordens mais atrasadas;
- Foco no controlo localizado no posto de trabalho: as decisões operacionais são tomadas tendo em conta cartões alocados um a cada par consecutivo de postos de trabalho;
- Revisão contínua: a decisão de produção ou revisão depende da disponibilidade de cartões que circulam continuamente;
- Integração parcial com sistemas de informação: o sistema utiliza cartões permitindo um controlo visual mas também depende, inicialmente, do planeamento central para definir prazos, capacidades, ordens de produção etc. Por esse motivo, implementações em espaços fabris mais complexos, pode recorrer-se a sistemas de informação que oferecem uma gestão e acompanhamento, em tempo real, dos cartões.
- Facilidade média no ajuste do planeamento: oscilações pequenas são absorvidas pelos cartões e pelo controlo de capacidade porém, flutuações mais exigentes requerem um ajuste do plano inicial;

- Tipologia de produção do tipo *job shop*: dado o controlo com recurso a cartões entre pares de postos de trabalho, torna-se, por isso, adequado em ambientes com fluxos produtivos variáveis onde é fundamental assegurar a sincronização entre as operações.

Classificação do WLC

- *Trigger*: usualmente é *pull* existindo variantes que combinam o *pull release* com o *push* (forçado) mesmo que implique exceder os *workload limits* em alguns postos de trabalho, ou seja, híbrido;
- Geração explícita de ordens: as ordens são geradas após o *job entry*, fase correspondente ao registo da encomenda no sistema sendo, posteriormente, enviadas para o *pre-shop pool*, onde aguardam até existir capacidade para a sua receção no espaço fabril;
- Lançamento das ordens baseado em carga: o sistema compara a carga atual do espaço fabril com os *workload limits* de forma a analisar se existe capacidade disponível para receber a ordem na produção;
- Despacho/priorização: são utilizadas regras simples de priorização (FIFO ou ODD) uma vez que, por existir um controlo da carga lançada em produção, o controlo ao nível das filas de espera é, geralmente, menos importante e a complexidade do despacho é, também, reduzida;
- Foco no controlo localizado no sistema: as decisões operacionais são tomadas com base em regras formalizadas e controladas por um sistema que controla e acompanha a carga de trabalho;
- Revisão contínua: o WIP é controlado continuamente;
- Integração parcial com sistemas de informação: para que o sistema seja capaz de gerir eficazmente o *pre-shop pool*, é necessário recorrer a sistemas de informação que controlam os níveis de WIP, estado das ordens e os *workload limits*;
- Facilidade média no ajuste do planeamento: o sistema permite um ajuste dinâmico a partir do *pre-shop pool* por isso, qualquer alteração poderá ser gerida apenas nesse local sem ser necessário ajustar o planeamento do sistema, porém, oscilações mais significativas podem exigir ajustes dos parâmetros e dos *workload limits*;
- Tipologia de produção do tipo *job shop*: dado o uso de *workload limits* e do *pre-shop pool*, é possível assegurar o controlo do WIP a partir do fluxo de

entradas de ordens na *pool* tornando-o adequado em ambientes com elevada variabilidade onde é fundamental assegurar o controlo das ordens antes destas entrarem no espaço fabril.

Classificação do COBACABANA

- *Trigger*: funciona a partir de datas de entrega estabelecidas no *pre-shop pool* e a sua produção inicia-se com base em previsões independentemente do estado atual do sistema, ou seja, *push* e *pull* pois o lançamento da ordem para o espaço fabril depende da capacidade real nas etapas a jusante do fluxo produtivo (híbrido);
- Geração explícita de ordens: as ordens são organizadas no *pre-shop pool*, tendo em conta critérios, como datas de entrega e indicadores de desempenho, onde aguardam até serem lançadas no espaço fabril acompanhadas por cartões;
- Lançamento das ordens baseado em carga: o sistema só permite a entrada de novas ordens no espaço fabril quando o *central planner* verificar a existência de capacidade a partir de cartões atribuídos de acordo com o volume de trabalho aceite em cada posto;
- Despacho/priorização: são utilizadas regras simples de priorização (FIFO ou EDD) controladas pelo *central planner*;
- Foco no controlo localizado no sistema: as decisões operacionais são tomadas e controladas por um sistema que controla e acompanha a carga de trabalho e por regras previamente definidas;
- Revisão contínua: a prioridade das ordens é ajustada continuamente em tempo real;
- Integração parcial com sistemas de informação: apesar do recurso a cartões, neste sistema, são, também, considerados dados em tempo real do espaço fabril o que requer que essa informação seja, constantemente, atualizada e enviada ao *central planner*. Para isso, torna-se necessária a integração com sistemas de informação;
- Facilidade média no ajuste do planeamento: o sistema adapta-se dinamicamente a oscilações através do uso do *pre-shop pool* e de cartões. Porém, como o planeamento é centralizado, flutuações mais complexas podem exigir intervenções mais significativas;
- Tipologia de produção do tipo *job shop*: dada a atuação do *central planner* e do controlo do WIP através da *pre-shop pool*, torna-se, então, eficaz em ambientes produtivos com elevada variabilidade e percursos diferentes no espaço fabril.

A Tabela 4.1 apresenta a *framework* de forma a sintetizar a classificação dos diferentes sistemas analisados.

Capítulo 5

Insights para a Prática Industrial decorrentes da Combinação de Modelos

Contrariamente aos modelos convencionais que seguem uma abordagem *pull* ou *push* de forma isolada, e dos modelos híbridos que resultam da combinação dessas mesmas abordagens num modelo que segue as próprias regras de implementação de forma coordenada, os modelos mistos caracterizam-se pelas combinações entre os modelos já existentes. Assim, os modelos mistos têm como objetivo tirar o máximo partido das vantagens específicas de cada um. Estes modelos são desenvolvidos por iniciativa própria das empresas, que implementam estas combinações de forma a adaptarem-se às necessidades do espaço fabril em questão.

O *Synchro* MRP é um exemplo de modelo misto com designação própria, sendo, por isso, reconhecido na literatura científica. Contudo, outros, mesmo que implementados no espaço fabril, de forma autónoma, por parte das empresas, poderão não dispor de uma nomenclatura própria.

A pesquisa bibliográfica centrou-se na análise de um conjunto de artigos científicos, publicados em revistas científica e em atas de conferência, a partir da base de dados b-on. Esta plataforma foi escolhida devido à sua vasta coleção de conteúdos reconhecidos a nível internacional, assegurando uma maior qualidade e fiabilidade das fontes utilizadas ao longo do estudo. De forma a orientar e alinhar a pesquisa

com o tema da investigação, definiram-se as seguintes palavras-chave: *Production planning*, *Production control*, *Manufacturing planning*, *Manufacturing control*, *case*, *study*, *simulation*, MRP*, Kanban, TKS, CONWIP, DBR/OPT, OPT, TOC, WLC, *Workload Control*, *Inventory Management Systems*, POLCA, COBACABANA. A TOC também foi incluída como palavra-chave uma vez que, por vezes, os autores adotam-na em vez de se referirem, diretamente, ao DBR/OPT.

Tendo em conta as palavras-chave, foi então desenvolvida uma *string* aplicada a cada um dos modelos analisados. Utilizaram-se operadores *AND* e *OR*, de forma a apresentar artigos que incluam todos os termos, simultaneamente, definidos e abranger diferentes expressões com o mesmo conceito, respetivamente. Adicionalmente foi aplicado um filtro para serem selecionados artigos presentes em revistas científicas (analisadas pelos pares) e atas de conferências, com acesso ao texto integral via editor e inglês como linguagem pretendida. Para além disso, optou-se por uma filtragem pelo campo TI (título) a alguns termos definidos na *string*, para os mesmos surgirem no título dos artigos de forma a obter uma correspondência mais focada com o tema e ainda foi definido um intervalo de 20 anos, ou seja, revistas científicas e conferências desde 01/01/2000. Resultando, assim, nas seguintes *strings*: ("production planning"OR "production control"OR "manufacturing planning"OR "manufacturing control") AND ("case"AND "study"OR "simulation") AND TI (NOME DO MODELO).

O "NOME DO MODELO"tomou os seguintes valores: "MRP*", "Kanban"OR "TKS", "CONWIP", "DBR/OPT" OR "OPT"OR "TOC", "WLC"OR "Workload Control", "inventory management systems", "POLCA"e "COBACABANA".

A Figura 5.1 apresenta os resultados da pesquisa, o número de artigos excluídos segundo os critérios definidos e os incluídos na análise. Foram ainda incluídos 3 artigos resultantes de uma pesquisa exterior à *string* totalizando em 10 artigos incluídos.

Data Bases		Search in b-on									
Keyword Level 1		("production planning" OR "production control" OR "manufacturing planning" OR "manufacturing control")									
Keyword Level 2		AND									
Keyword Level 3		("case" AND "study" OR "simulation")									
No. of papers		TI ("MRP**")	TI ("Kanban" OR "TKS")	TI ("CONWIP")	TI ("DBR/OPT" OR "OPT" OR "TOC")	TI ("WLC" OR "Workload Control")	TI ("Inventory management systems")	TI ("POLCA")	TI ("COBACABANA")	AND	AND
Pool of papers		N = 190	N = 183	N = 80	N = 38	N = 97	N = 4	N = 22	N = 5	N = 5	
Exclusion Criteria 1		Number of papers in the pool									
Exclusion Criteria 2		Number of papers excluded for not being in journal article or conference									
Exclusion Criteria 3		Number of papers excluded for not being written in English									
Screening		N = 37	N = 64	N = 3	N = 2	N = 8	N = 0	N = 3	N = 0	N = 0	
Eligibility		N = 15	N = 0	N = 8	N = 6	N = 6	N = 0	N = 1	N = 0	N = 0	
Exclusion Criteria 1		Number of papers excluded in title review									
Exclusion Criteria 2		Number of papers excluded for not within year range									
Exclusion Criteria 3		Number of papers excluded for no full-text access via publisher									
Screening		N = 0	N = 12	N = 5	N = 4	N = 4	N = 1	N = 0	N = 0	N = 0	
Eligibility		N = 0	N = 0	N = 2	N = 0	N = 0	N = 0	N = 0	N = 0	N = 0	
Exclusion Criteria 1		Number of papers excluded in full text review									
Screening		N = 32	N = 3	N = 19	N = 25	N = 28	N = 3	N = 17	N = 5	N = 5	
Eligibility		1 paper were included	3 papers were included	1 papers were included	1 papers were included	0 papers were included	0 papers were included	1 paper were included	0 papers were included	0 papers were included	
Screening		7 paper were included									

Figura 5.1: Resultados da string para os modelos mistos.

5.1 Revisão de literatura

Dos artigos resultantes e incluídos na análise anteriormente referida, foi possível elaborar uma análise de quais os modelos mistos de PPCP implementados, as metodologias usadas (simulação, casos de estudo ou casos reais não documentados) e os principais contributos identificados, nomeadamente quanto à eficiência, flexibilidade ou adaptabilidade destes modelos nos espaços fabris.

Inicialmente será apresentada uma revisão dos modelos mistos, encontrados através da pesquisa, com designação formal reconhecida na literatura prosseguindo para as combinações de modelos implementados sem nomenclatura.

Este estudo permitiu identificar quais as combinações já implementadas, descrever o seu funcionamento nos diversos ambientes industriais e analisar o seu desempenho.

Serão também analisadas as várias comparações dos modelos convencionais e híbridos, apresentadas pelos autores, como forma a perceber em que contextos cada modelo é mais eficiente.

5.1.1 *Synchro* MRP

De acordo com Bertolini et al. (2013), o *Synchro* MRP foi desenvolvido pela empresa Yamaha Motor Company em 1970, tendo como objetivo ultrapassar as limitações apresentadas pelos modelos convencionais em ambientes produtivos com elevadas variedades de produtos e longos tempos de *setup*.

O seu funcionamento segue os princípios do MRPII para definir o plano de produção e utiliza os princípios do Kanban para coordenar o fluxo de materiais e de informação entre as máquinas ao longo do fluxo produtivo.

Num sistema produtivo onde esteja implementado o *Synchro* MRP, é necessário que exista, em cada posto de trabalho, um ponto de stock de saída, local onde se colocam os produtos acabados, e um ponto de stock de entrada, situado no posto de trabalho seguinte, onde são recebidas as peças para a próxima etapa do fluxo produtivo. Existem, também, dois tipos de cartões atribuídos a cada posto de trabalho e alocados a cada número de peça correspondente (identificador único atribuído a cada componente): o cartão *Synchro* 1 (S1), que acompanha todo o percurso realizado pela peça de um ponto de stock de saída para o ponto de stock de entrada do posto seguinte, e o cartão *Synchro* 2 (S2) com a função de acionar o gatilho para desencadear as atividades produtivas, sendo, simultaneamente, necessária a geração de ordens provenientes de um plano MRP para que a produção seja, efetivamente, iniciada.

A geração de ordens é realizada recorrendo a um plano MRP, designado *final assembly schedule*, onde se encontram todas as informações como quais os produtos e em que quantidades devem ser produzidos (tal como acontece no MPS), sendo

possível, dimensionar a quantidade de cartões *Synchro* necessários por produto e por etapa. A informação da necessidade de produção é, então enviada, para postos críticos do espaço fabril, isto é, postos estrategicamente selecionados para receber estas ordens. Os postos críticos são escolhidos tendo em conta a sua localização no espaço fabril, assim, postos mais a jusante ou mais próximos do final do fluxo produtivo são, normalmente, escolhidos. Tal acontece uma vez que o último posto de trabalho é onde são feitos os pedidos de novas ordens aos postos anteriores e assim sucessivamente. Desta forma, o fluxo produtivo funciona quando o último posto puxa uma peça e o posto a montante executa a ordem se possuir o cartão S2 válido e uma ordem proveniente do plano *final assembly schedule*. É possível interromper a produção de uma determinada ordem, bloqueando os cartões *Synchro* alocados à mesma no posto crítico mais a jusante. Esse posto deixará de puxar a ordem e, conseqüentemente, postos localizados a montante, por falta de cartões válidos com ordens ativas, bloqueiam a sua produção.

Em suma, o seu funcionamento é iniciado quando o MRP gera ordens de produção, tendo em conta informações do *final assembly schedule*, que são enviadas para os postos definidos como críticos do espaço fabril. O sistema lança os cartões, S1 e S2, em quantidades previamente definidas no *final assembly schedule* permitindo o acompanhamento das peças entre os postos (S1). O fluxo produtivo avança continuamente entre os postos se existir um cartão (S2) válido e uma ordem de produção proveniente do plano MRP.

Bertolini et al. (2013) referem ainda a aplicação do *Synchro* MRP numa empresa que produz injetores eletrónicos. A empresa utilizava apenas o Kanban o que resultava ao acúmulo de WIP sendo, por isso, pouco eficiente. Com recurso à ferramenta SyVSM (*Synchro Value Stream Mapping*), foi possível analisar e identificar a estação crítica do sistema produtivo e implementar nessa o controlo dos cartões *Synchro*. Os cartões S1 tinham a função de autorizar a movimentação das ordens entre as estações enquanto os S2 autorizavam a produção tendo em conta o *final assembly schedule*. A implementação do *Synchro* MRP permitiu uma redução do WIP do sistema em 26,%, comparativamente ao WIP quando implementado o Kanban, e do *lead time* de 22,7 dias para 16 dias.

Felberbauer et al. (2012) defendem que não está definida qual a política de alocação de máquinas mais eficiente quando combinados o MRP com Kanban no mesmo espaço fabril, se segmentada (isolar máquinas para peças MRP de máquinas para peças Kanban) se não segmentada (utilizar as mesmas máquinas para ambos os sistemas) com recurso a *dispatching rules* (EDD) atribuídas às datas dos cartões kanban. A simulação teve como objetivo analisar a forma como essas políticas influenciam os custos de stock, custos de rutura de stock e o *service level* em 3 cenários de simulação (grandes lotes de produção, pequenos lotes e lotes com menor volume de encomendas).

Dessa implementação foi possível evidenciar que em grandes lotes será mais adequado não segmentar promovendo uma maior flexibilidade e menor custo de *setup*, contrariamente em lotes pequenos é adequado segmentar devido a um *setup* mais frequente. Relativamente ao lote com menor volume de encomendas será mais adequado não segmentar uma vez que o sistema perderá a flexibilidade. Produtos com Kanban apresentam *service level* superior aos com MRP, especialmente em sistemas não segmentados. Assim, o MRP diminui o seu desempenho com a concorrência por recursos originando a acumulação de atrasos, custos de rutura mais frequentes e um *service level* reduzido.

Foi implementado o *Synchro* MRP numa empresa de produção de injetores com elevada variabilidade de produtos e tempos de *setup*, com o objetivo de reduzir o excesso de produção, custos de stock, tempos de *setup* e garantir um tempo de resposta eficaz para o cliente. Assim, foi definida a estação crítica, ou seja, estação onde todos as peças convergiam, para receber ordens do MRP e autorizar ou bloquear cartões *synchro* para as restantes estações e fornecedores.

Foram utilizados dois tipos de cartões *synchro*: cartões *synchro* eletrónicos (emitidos de forma automática pelo MRP), com as funções de alinhar o consumo real com a compra, sendo bloqueados sempre que não exista necessidade real, e cartões *synchro* físicos/internos, que controlam o arranque da produção do sistema. De seguida, a produção foi sincronizada com a procura real e dimensionado o sistema *Synchro* tendo em conta o *Fixed Order Quantity*, as encomendas são feitas em quantidades fixas sempre que o stock atinge o ponto de reposição, e *Fixed Order Interval*, as encomendas são feitas em quantidades variáveis e em intervalos de tempo fixos. Como resultado, o WIP global foi reduzido em 26.7% e o *lead time* total da produção deixou de ser de 22.7 dias para 16 dias.

5.1.2 Modelos Mistos sem Designação Própria

Dos modelos mistos sem designação própria, ou seja, que foram desenvolvidos por iniciativa própria das empresas, destacam-se algumas combinações, nomeadamente, Kanban+CONWIP, DBR/OPT+MRP, COBACABANA+POLCA e DDMRP+CONWIP, que serão analisados ao longo do capítulo.

Desenvolvido por Bonvik et al. (1997), o *Hybrid* Kanban/CONWIP considera-se um modelo misto de planeamento e controlo da produção uma vez que tem por base dois modelos convencionais: o Kanban e o CONWIP. O seu objetivo é tirar o maior proveito dos benefícios da implementação de ambos os modelos, nomeadamente, nos níveis de stock e de serviço.

O seu funcionamento utiliza, como anteriormente referido, princípios do Kanban e do CONWIP, em simultâneo. Assim, são também utilizados cartões que são distribuídos, inicialmente, pelo primeiro posto de trabalho da linha produtiva e acompanham o produto ao longo da mesma. Quando o produto chega ao final

do ciclo produtivo, o cartão é então retirado e enviado, novamente, para o início sinalizando a necessidade de produção de novas peças. Os cartões possuem, então, todas as informações das peças às quais estão alocados.

O *Hybrid Kanban/CONWIP* funciona segundo o Kanban, com o uso de cartões que autorizam a produção e limitam a quantidade de stock entre duas estações de trabalho, e segundo o CONWIP, pois limita a quantidade de cartões a circular na linha produtiva, ou seja, há um limite fixo de WIP no sistema. Desta forma é possível mitigar desperdícios, excesso de produção e a acumulação de stock.

Irá ser considerado o seguinte exemplo da implementação do sistema numa empresa de componentes automóveis:

- O primeiro posto de trabalho é informado que irá ter início a produção de novas peças a partir da saída do produto do sistema produtivo;
- É alocado um cartão com a função de autorizar a produção de novas ordens e que acompanha a peça ao longo da linha produtiva;
- Na última etapa, o cartão é removido e enviado novamente à primeira etapa retomando um novo ciclo produtivo,

Desta forma, é possível evidenciar que o sistema só inicia a sua atividade produtiva quando a peça sai do sistema.

Prakash e Chin (2014) implementam *Hybrid Kanban/CONWIP* com a adoção do Kanban com o CONWIP de forma paralela, ou seja, com os mesmos recursos mas cada sistema implementa as suas regras ao longo do fluxo produtivo, numa empresa de painéis compósitos para aviões comerciais. É descrito que durante a implementação da fase com Kanban pelas fases de submontagem, oficina de pintura e montagem final, cada movimentação de material é acompanhada por um cartão kanban sendo atribuídos a cada etapa, desde a expedição até à receção. Assim, que o produto é concluído na fase de montagem final, o cartão é retirado e colocado no quadro kanban autorizando o início da referente à oficina de pintura. Quando a oficina de pintura termina o seu processo, o cartão é retirado e colocado novamente no quadro kanban autorizando o início da fase de submontagem. Este processo repete-se, sucessivamente. Este sistema é atribuído ao produto com maior procura.

A quantidade de cartões kanban é ajustada de forma a equilibrar o WIP e o CONWIP é atribuído a produtos com pouca procura. Os cartões são enviados para o início do fluxo produtivo e acompanham o produto até este ser expedido. Assim que o produto é então expedido, o cartão retoma ao departamento de planeamento para receber uma nova encomenda. Assim, a quantidade fixa de cartões ativos controla a quantidade de conjuntos em produção e evita a criação de stock desnecessário (só há produção com cartão).

Esta implementação traduziu-se em discrepâncias entre o sistema proposto e o sistema efetivamente implementado nomeadamente em atrasos na receção de novas peças o que dificultava a movimentação de cartões para as fases a montante do fluxo. Após ser proposto o envio de cartões tendo em conta o trabalho previsto a ser realizado e não apenas o trabalho concluído, o desempenho do *Hybrid Kanban/CONWIP* melhorou significativamente.

Chong et al. (2016) descrevem a que a implementação do *Hybrid Kanban/CONWIP* teve como objetivo a redução de WIP enquanto se equilibrava a flexibilidade dos produtos com diferentes procura. Assim, o Kanban foi utilizado para produtos com alta procura e o CONWIP para baixa procura. O seu funcionamento foi desenvolvido paralelamente, ou seja, são utilizados os mesmos recursos mas cada sistema implementa as suas regras. Foram utilizados 3 etapas produtivas, 3 *buffers* e 3 tipos de kanban (kanban padrão para produtos com alta procura, kanban CONWIP para produtos de baixa de kanban de ordem). Para produtos de alta procura, o seu funcionamento é acionado com o consumo de um lote na última etapa do fluxo produtivo. Esta possui um kanban padrão que, quando concluído o processo, retoma à primeira etapa sinalizando a necessidade de reabastecimento. Para produtos de baixa procura, cada encomenda gera um kanban de ordem que é alocado ao kanban CONWIP. Estes dois cartões iniciam a produção na primeira etapa do processo produtivo. O kanban ordem acompanha o produto até à última etapa onde permanece até à conclusão da ordem. Como existe uma quantidade limitada de kanban CONWIP, é possível regular o WIP para produtos de baixa procura. Produtos fora do sistema kanban (ou seja, quando não existem kanban padrão nem kanban CONWIP) possuem menor prioridade para evitar a acumulação de WIP.

Gaury et al. (2000) demonstram uma implementação prática do *Hybrid Kanban/CONWIP* em 3 tipos de linhas produtivas onde foram utilizados cartões kanban no início e meio da mesma e cartões CONWIP para controlar o WIP total do sistema. As últimas etapas utilizam a abordagem *push* de forma a responder rapidamente à procura garantindo a existência de um produto concluído em stock. Como resultado, verificou-se uma redução do WIP comparativamente à utilização do Kanban ou CONWIP quando usados de forma isolada. Os níveis de serviço subiram para 99,5% com a alocação do stock ao longo do fluxo produtivo e numa maior facilidade no ajuste do mesmo para diferentes comprimentos.

Hadas e Cyplik (2007) apresentam um caso de estudo do modelo MRP/DBR numa empresa fabricante de motores marítimos de alta potência caracterizada por produtos complexos com *lead times* longos, elevado consumo de recursos, existência de gargalos permanentes no espaço fabril e elevada instabilidade nos agendamentos com interrupções frequentes. O MRP/DBR utiliza o MRP para o nível de planeamento agregado e o DBR para a execução e controlo do espaço fabril, são também utilizados *buffers* de tempo, expedição e de recursos críticos de forma a gerir as

quebras no fluxo produtivo.

A implementação deste sistema promoveu a eficiência global da empresa (em ambiente MTO), a capacidade de resposta a quebras no fluxo produtivo e a continuidade do fluxo nos gargalos.

Wuttipornpun e Yenradee (2007) propõem o sistema TOC-MRP composto por 7 etapas: na primeira etapa o sistema MRP é utilizado com *lead time* variável para decompor a encomenda nas operações necessárias à sua conceção e determinar as datas de lançamento e conclusão em cada operação. A segunda etapa é responsável por programar os centros de trabalho com base nas datas de conclusão a fim de identificar limitações de capacidade nos centros de primeira prioridade. A terceira etapa refere-se à realocação de operações de segunda prioridade para aliviar a carga dos centros de primeira prioridade. Já na quarta etapa é definida a sequência das ordens através de regras simples de despacho (EDD, SPT e *Minimum Slack Time* (MST)). A quinta etapa ajusta o *timing* de cada operação, de acordo com as direções do escalonamento, sem alterar a sequência estipulada na etapa anterior. A sexta etapa garante que os centros de trabalho com gargalo deverão ter cronogramas fixos enquanto os não-gargalo poderão ser ajustados tendo em conta o princípio da DBR (subordinar tudo à restrição). A sétima e última etapa é responsável por eliminar a antecipação excessiva, ajustando os tempos de entrega para os prazos de entrega serem cumpridos, e reduzir o atraso sempre que possível. O TOC-MRP foi implementado numa empresa de produção de componentes automóveis. Nos centros de gargalo foi possível aliviar os picos de carga sem atrasar as ordens e nos centros de não gargalo existiu mais folga na capacidade pois produziu-se com antecedência o início da operação sempre que se torna-se útil para o sistema e adiado para reduzir a acumulação de stock e mitigar horas extra.

O sistema aumentou o seu desempenho com a redução de horas extra, flexibilidade na movimentação das operações, sem influenciar negativamente os prazos de entrega, mantendo o equilíbrio entre eficiência e cumprimento de prazos.

Thürer et al. (2020), apresentam a implementação de um modelo de simulação *flow shop* com recurso ao *software* ARENA do modelo misto COBA-POLCA que combina as vantagens dos sistemas COBACABANA e POLCA de forma a decidir se uma determinada ordem deverá ser lançada para o espaço fabril e se uma estação está autorizada a iniciar a produção. O seu funcionamento é descrito da seguinte forma: o COBACABANA controla o lançamento de trabalhos do *backlog* para a primeira estação tendo em conta os limites de carga definidos e o POLCA irá controlar o lançamento de trabalhos para as estações através de cartões entre pares de estações. Os indicadores para avaliar COBA-POLCA serão a pontualidade de entrega, tempos médios de produção, atrasos médios e os níveis de WIP. O POLCA recorre a cartões de prevenção de inatividade (*starvation avoidance cards*) como forma de prevenir situações em que todos os cartões POLCA disponíveis estão na estação a jusante.

Assim mesmo que não existam cartões POLCA disponíveis, os cartões de inatividade são associados a essa ordem mesmo que ultrapasse o limite de WIP.

A combinação destes sistemas levou a uma redução de 15% a 26% dos tempos de produção, 6% a 9% nos tempos totais de produção, 1% a 14% na percentagem de ordens em atraso e 6% a 14% de redução no atraso médio. O COBACABANA e o POLCA demonstram ser sistemas eficazes quando implementados de forma isolada porém, a sua combinação apresenta melhores resultados.

Camargo et al. (2023) descrevem um caso de estudo na indústria dermocosmética que se deparava com problemas em alocar um lote de champôs a granel a vários produtos finais. Uma única produção de champô pode originar vários produtos finais, por isso a empresa enfrentava o desafio de como alocar de forma eficiente um lote fixo de champôs por vários de produtos finais compatíveis sem originar sobreprodução, escassez de produtos, aumento do WIP e de acumulação de stock e ainda mitigar dificuldades no planeamento produtivo. Assim, foram realizados dois estudos para contornar este problema: um que adotava a combinação do DDMRP com CONWIP sobre a produção de champô e outro onde esta combinação seria sobre todo o processo produtivo. O primeiro estudo consistiu em alocar um cartão CONWIP a uma ordem de produção de champô e quando a mesma estivesse concluída, retirar-se-ia o cartão e o mesmo seria enviado para o início do fluxo produtivo. Quando este regressasse então ao início, analisava-se o buffer com maior necessidade e a alocava-se a ordem tendo em conta esse buffer. Isto levou a que a alocação fosse adiada até que existisse cartões CONWIP e necessidade real de produção. Relativamente ao segundo estudo, cada cartão representava um determinado volume de champô (volume total permitido de 13 cartões com 10 toneladas cada) a circular pelo fluxo. Sempre que existisse pelo menos 10 toneladas por cartão, considerava-se que este estava livre, iniciava-se uma nova ordem e o sistema selecionava o buffer com maior prioridade. De seguida o champô a granel era alocado pelos produtos finais tendo em conta as suas necessidades e o estado dos buffers DDMRP. No final do processo o cartão CONWIP voltava ao início do fluxo produtivo simbolizando a sua disponibilidade para iniciar um novo ciclo. Isto permitiu que a empresa conseguisse equilibrar os níveis de serviço, tempos de fluxo e os níveis de stock mesmo em ambientes com alta variabilidade de produtos.

5.2 Discussão dos Resultados da Revisão Sistemática da Literatura como Geração/Identificação de *Insights* para a Prática Industrial

Da revisão de literatura é possível perceber que os estudos referentes aos modelos mistos são bastante escassos, os mesmos estão apresentados na Tabela 5.1 como

forma de auxiliar visualmente na identificação de quais as combinações propostas pelos autores anteriormente referidas. A tabela possui uma divisão diagonal, do seu lado esquerdo estão as simulações e do lado direito os casos de estudo dos artigos estudados. Os casos reais não documentados representados por "c" correspondem aos artigos que descrevem estudos práticos reais implementados em empresas (Bertolini et al. (2013) e Prakash e Chin (2014)).

Tabela 5.1: Síntese bibliográfica dos casos de estudo ou simulação referente aos modelos mistos.

Casos de estudo / Simulação		Modelos Convencionais					Modelos Híbridos				
		MRP	Modelos de Reposição de Stock	Kanban	CONWIP	DBR/OPT	WLC	DDMRP	POLCA	COBACABANA	
Modelos Convencionais	MRP			c		Hadas e Cyplick (2007)					
	Modelos de Reposição de Stock										
	Kanban	Felberbauer et al. (2012)									
	CONWIP			Gaury et al. (2000)				Camargo et al. (2023)			
				c							
				Chong et al. (2016)							
DBR/OPT	Wuttipornpun e Yenradee (2007)										
Modelos Híbridos	WLC										
	DDMRP				Fernandes et al. (2025)						
	POLCA										
	COBACABANA								Thürer et al. (2020)		

c - Casos reais não documentados

A partir da Tabela 5.1 verifica-se uma tendência na literatura em analisar, com recurso a simulações, modelos mistos em detrimento de estudos com casos de estudo. Também se observa que muitas combinações de modelos ainda não foram exploradas (por exemplo, MRP com POLCA), representando uma lacuna para investigações futuras.

Bagni et al. (2021) defendem que quase todos os PPCP's foram apenas desenvolvidos na teoria uma vez que os avanços na computação facilitam a simulação,

tornando-a mais próxima da realidade do espaço fabril. Contudo, este cenário também contribuiu para muitos PPCP's não apresentarem estudos empíricos com aplicações práticas apesar da relação teoria com a prática poder resultar em contradições, o mesmo poderá aplicar-se ao estudo dos modelos mistos.

Combinar modelos de reposição de stock, focados na geração das ordens com modelos que controlam o fluxo de materiais, com o Kanban, CONWIP ou WLC, tornar-se-ia interessante. Assim, e apesar de não serem resultados da *string*, estudar combinações entre mecanismos com funções distintas, isto é, mecanismos mais focados na geração de ordens e mecanismos mais focados ao nível do controlo do fluxo de materiais, poderia apresentar resultados vantajosos em ambientes produtivos complexos em termos de estabilidade e previsibilidade do espaço fabril.

A correta combinação destes mecanismos poderá resultar num controlo eficaz do fluxo de ordens no espaço fabril, regulando o *lead time* e mitigando sobrecargas do sistema o que resultará no aumento do desempenho produtivo das empresas.

A análise dos artigos também apresentou um conjunto de *insights* práticos, nomeadamente, a redução de WIP com a adoção de modelos mistos nos espaços fabris, a eficiência em produtos personalizáveis e/ou com alta variabilidade. Também se verificou um aumento do equilíbrio do *throughput*, dos níveis de serviço e uma gestão dos níveis de stock mais eficiente quando os modelos funcionam de forma combinada.

Da revisão de literatura também foram analisadas os artigos que comparavam os diferentes modelos de PPCP. Assim, foi possível construir a Tabela 5.2 para demonstrar, de forma visual, quais os modelos comparados entre si.

Tabela 5.2: Síntese bibliográfica de estudos comparativos entre modelos.

		Modelos Convencionais				Modelos Híbridos				
		MRP	Modelos de Reposição de Stock	Kanban	CONWIP	DBR/OPT	WLC	DDMRP	POLCA	COBACABANA
Modelos Convencionais	MRP				H. Jodlbauer (2008)	Thürer et al. (2022)		Velasco Acosta et al. (2020)		
	Modelos de Reposição de Stock									
	Kanban	Krishnamurthy et al. (2004)			Jaegler et al. (2018)	Watson e Patti (2008)				
		Thürer et al. (2022)			Khojasteh-Ghamari (2009)					
	CONWIP			Khojasteh-Ghamari (2018)		H. Jodlbauer (2008)				
		Framinan et al. (2003)		Li (2011)		Framinan et al. (2003)				
		Jaegler et al. (2018)		Framinan et al. (2003)		Jaegler et al. (2018)				
DBR/OPT	Gupta e Snyder (2009)		Tomaszewska (2023)	Koh e Bulfin (2004)			Thürer et al. (2022)			
Modelos Híbridos	WLC									
	DDMRP	Kortabarria et al. (2018)			Fernandes et al. (2025)					
	POLCA				Fraze e Standridge (2016)					
	COBACABANA			Thürer et al. (2019)						

Thürer et al. (2022) analisaram e compararam o desempenho dos diferentes PPCP's a partir de simulações. O desempenho do MRP face ao, DBR/OPT, DDMRP e Kanban é bastante inferior. Tal deve-se ao facto do MRP não ser capaz de ser reajustado conforme as variações que surjam no planeamento. Também se verificou que, se existir um gargalo no sistema então o DBR/OPT e o DDMRP superam tanto o Kanban como o MRP. Caso esse gargalo seja moderado (apesar de ser uma etapa com capacidade limitada, ainda consegue acompanhar a procura), o DDMRP apresenta melhor desempenho comparativamente ao DBR/OPT. O Kanban, comparativamente ao MRP, apresenta melhor desempenho uma vez que o MRP depende de previsões da procura não se adaptando flutuações. Desta forma, em ambientes relativamente estáveis, o Kanban supera o MRP.

Velasco Acosta et al. (2020) demonstram que o DDMRP, em espaços fabris complexos e com elevada incerteza nos tempos de entrega, apresenta melhor desempenho que o MRP. Assim, o DDMRP, segundo os autores, é eficiente em ambientes complexos e dinâmicos se os *buffers* estiverem corretamente posicionados.

Gupta e Snyder (2009) referem que apesar dos vários estudos comparativos, nenhum sistema é universalmente superior ou melhor a outro uma vez que a sua

eficiência depende do contexto produtivo em que está inserido, dão ainda o exemplo que o DBR/OPT é mais adequado em espaços fabris com níveis de stock moderados e onde existam gargalos enquanto o MRP torna-se mais eficiente para elevados níveis de stock.

H. Jodlbauer (2008) partir da simulação de um espaço fabril *flow shop*, o CONWIP apresentou melhor *service level* mas maior sensibilidade a oscilações no sistema, porém, o MRP demonstrou ser mais estável a estas variações. O Kanban, por sua vez, também é mais estável, mas em ambientes com alta variabilidade o seu desempenho diminui, devido aos constantes ajustes na sua parametrização. Por fim, o DBR/OPT é considerado simples na sua parametrização mas o seu desempenho é intermédio comparativamente ao desempenho do CONWIP.

Kortabarria et al. (2018) analisam o desempenho do DDMRP numa empresa onde estava adotado o MRP. Assim, o DDMRP apresentou uma redução do nível de stock, o aumento não só da visibilidade do fluxo produtivo como também do consumo de materiais em relação ao MRP. Miclo et al. (2015) também evidenciam que o DDMRP apresenta um WIP mais reduzido e uma maior adaptação à procura comparativamente ao MRP.

Thürer et al. (2019) comparam o COBACABANA com o Kanban em termos de redução de WIP, *lead time*, nível de serviço e a eficiência do sistema. Assim, o COBACABANA supera o Kanban por apresentar maior fiabilidade no cumprimento de prazos de entrega, otimização dos recursos e um WIP menor. Contudo, o Kanban é considerado um modelo mais simples de implementar e gerir sendo adequado em ambientes estáveis e repetíveis.

Li (2011) descrevem que o CONWIP, em ambientes MTO, é mais estável e leva a um melhor controlo do WIP comparativamente ao Kanban que se mostra mais sensível à variabilidade. O CONWIP revela-se mais eficiente em espaços fabris de alta variabilidade e mix de produtos devido à sua simplicidade de implementação e controlo.

Tomaszewska (2023) realizaram um estudo com o objetivo de comparar o DBR com o Kanban. A partir deste foi possível evidenciar que o DBR apresenta melhor sincronização entre a taxa de produção e os recursos utilizados, reduzindo mais desperdícios e gerando mais lucro. Em contrapartida, o kanban mostra-se mais flexível e também mais adequado em ambientes com elevada variabilidade de produtos.

Khojasteh-Ghamari (2018) são simuladas duas linhas de produção para analisar o desempenho do Kanban e do CONWIP tendo em conta o WIP e o *throughput*. Os resultados demonstram que o CONWIP apresentou menos WIP para o mesmo *throughput*, em ambientes de elevada variabilidade, refletindo um melhor desempenho. Porém, em linhas mais equilibradas, o Kanban poderá responder de forma mais eficiente.

Koh e Bulfin (2004) comparam o DBR com o CONWIP a partir de uma simulação de uma linha produtiva com 3 estações, sendo a segunda correspondente ao gargalo. Neste contexto produtivo, o DBR mostrou um desempenho superior com o *throughput* e lucro líquido superiores aos evidenciados pelo CONWIP.

Krishnamurthy et al. (2004) simulam, em ambientes de elevada variabilidade de produtos, o Kanban com o MRP. O MRP apresentou um desempenho superior em relação aos níveis de stock devido à capacidade de prever a procura enquanto o Kanban resultou em elevados níveis de stock acumulado e atrasos no cumprimento de prazos.

Jaegler et al. (2018) apresentam uma revisão sistemática do CONWIP com o Kanban, MRP e CONWIP. Em relação ao Kanban, o CONWIP é mais adequado para ambientes com reduzidas variabilidades de WIP enquanto o Kanban é mais eficiente quando aplicado em ambientes equilibrados por apresentar WIP mais reduzido. O MRP apresenta um desempenho inferior ao CONWIP em ambientes com elevada incerteza (mais WIP e atrasos no fluxo produtivo) e por fim, se o gargalo for fixo e bem definido, apresenta um desempenho superior ao CONWIP.

Fraze e Standridge (2016) simulam um ambiente *high mix, low volume*, ou seja, de elevada variabilidade mas volumes reduzidos para comparar o desempenho do CONWIP com o do POLCA. A partir da simulação, foi possível verificar que o CONWIP apresentou melhor desempenho global em relação ao POLCA, uma vez que o CONWIP apresenta um *lead time* médio superior e atinge o mesmo *throughput* com menos WIP do que o POLCA.

Foram também realizadas em ambientes produtivos com linhas de montagem, desenvolvidas por Khojasteh-Ghamari (2009), de forma a comparar o Kanban com o CONWIP. O CONWIP superou o Kanban pois mostrou uma redução do WIP, uma maior estabilidade no *throughput* e um tempo de espera total do sistema reduzido. Porém também é referido que para linhas de montagem curtas e com pouca variabilidade, o Kanban poderá apresentar melhor desempenho.

Watson e Patti (2008) comparam o Kanban e o DBR/OPT a partir da simulação de ambos em situações que ocorrem paragens não planeadas de máquinas. Os resultados evidenciam que o DBR superou o Kanban pois além do Kanban ser mais vulnerável a falhas no sistema produtivo o DBR apresentou maior produção com menos stock e *lead time* mais curtos.

Fernandes et al. (2025) recorrem à simulação do DDMRP com o CONWIP alterando parâmetros como tempos de *setup* e variabilidade na procura. O objetivo do estudo consistiu em analisar o comportamento dos dois sistemas a funcionar em conjunto (combinados) com *Pool Sequencing* (regra para definir as prioridades na sequenciação da produção). Os resultados da implementação demonstraram um aumento da eficiência e flexibilidade e um aumento do desempenho do nível de serviço e de stock comparativamente ao DDMRP a funcionar isoladamente.

A partir da revisão de literatura da comparação dos modelos estudados torna-se perceptível que não existe um modelo de PPCP universalmente superior aos restantes, isto é, o desempenho de cada um irá depender do contexto produtivo em que será inserido bem como a existência de gargalos, níveis de stock, variabilidade de produtos, dos contextos produtivos e a estabilidade do sistema são fatores que, segundo diversos autores, impactam diretamente o desempenho de cada modelo.

O DDMRP, por exemplo, torna-se mais eficiente em ambientes produtivos mais complexos e de elevada variabilidade, segundo os autores Velasco Acosta et al. (2020), Kortabarria et al. (2018) e Miclo et al. (2015).

Estudos apresentados por Thüerer et al. (2022), Tomaszewska (2023) e Koh e Bulfin (2004) demonstram que o DBR/OPT supera o Kanban, MRP e o CONWIP se o gargalo for fixo e bem definido, proporcionando uma maior sincronização dos processos e maior eficiência.

H. Jodlbauer (2008), Li (2011), Khojasteh-Ghamari (2018), Frazee e Standridge (2016) afirmam que o CONWIP é mais eficiente em ambientes MTO e de elevada variabilidade pois controla de forma mais eficaz o WIP. Porém, quando comparado ao MRP, revela-se mais sensível eventuais oscilações do sistema.

De acordo com Thüerer et al. (2019), Watson e Patti (2008), Jaegler et al. (2018), o Kanban é menos adequado em ambientes com elevada variabilidade e paragens inesperadas uma vez que requer ajustes frequentes dos parâmetros operacionais como a quantidade de cartões a circular no espaço fabril e tamanhos de lote. A sua eficiência é maior em ambientes estáveis e com elevada repetitividade.

É referido por Thüerer et al. (2019) que quer o COBACABANA como o POLCA em termos de *lead time* e utilização de recursos, superam o Kanban. Porém, relacionando o COBACABANA com o POLCA, este apresenta um maior WIP.

Fernandes et al. (2025) referem que, se aplicada em ambientes de elevada variabilidade na procura e com necessidade de uma resposta imediata, a combinação do DDMRP com o CONWIP permitirá a uma redução do stock e melhora o nível de serviço do sistema.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro

A presente dissertação teve como objetivo identificar os modelos de planeamento e controlo da produção de forma a analisar quais as combinações que existem entre si e a forma como são implementadas.

Inicialmente foram realizadas pesquisas aprofundadas de quais os modelos existentes na literatura e como são descritos pelos vários autores. Dividiram-se, então, os modelos resultantes tendo em conta a abordagem adotada: modelos convencionais seguem uma abordagem *push* ou *pull* e os modelos híbridos seguem uma abordagem *push* e *pull*. Em seguida, os modelos foram analisados em detalhe apresentando as características de cada um, funcionamento, vantagens e desvantagens na sua implementação.

Um dos contributos deste trabalho foi o desenvolvimento de uma *framework* que permite classificar os modelos, anteriormente identificados, segundo dimensões de análise. Esta *framework* tem como objetivo apoiar as empresas na tomada de decisões adequadas aos diversos espaços fabris de forma a aumentar o seu desempenho enquanto reduz custos e desperdícios.

Outro contributo apresentado foi a identificação de quais os modelos híbridos existentes atualmente. Como a análise teórica pode divergir da análise prática, realizou-se uma revisão de literatura para explorar quais as combinações de modelos que tivessem sido, efetivamente, implementadas, quer com recurso a simulação quer com recurso a casos de estudo e ainda a partir de casos reais não documentados. Da

análise foi possível perceber que os estudos destas combinações surgiram como forma de colmatar limitações apresentadas pelos modelos isolados. Os estudos dos modelos mistos são muito reduzidos traduzindo-se numa lacuna na literatura científica.

Propõem-se, para trabalhos futuros, a exploração de novas combinações e o estudo mais profundo das já existentes. Poderá ser relevante perceber em que condições cada combinação será mais eficaz e reforçar o desenvolvimento de ferramentas que suportem a implementação destes modelos em cada empresa.

Bibliografia

- Abdullah, N. K., Mawardi, M. A. N. M., & Rashid, R. A. (2013). Economic Order Quantity (EOQ): An Alternative at Routine Maintenance Company. *IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*, 739–744.
- Andrade, A. L., Graziani, Á. P., Ferreira, A. M., de Carvalho Fernandes, A., & Perini, S. J. B. (2023). Implementation of the Kanban System in a Screw Production Line: A Case Study a Company in the Joinville Region. *Revista e-TECH: Tecnologias para a Competitividade Industrial*, 16(2), 1–10.
- Ávila, P., Bastos, J., & Cavaco, I. (2022). *PLANEAMENTO E CONTROLO DA PRODUÇÃO – Uma visão integrada*. Gestbook.
- Badinelli, R. D. (1992). A Model for Continuous-Review Pull Policies in Serial Inventory Systems. *Operations Research*, 40(1), 142–156.
- Bagni, G., Godinho Filho, M., Thürer, M., & Stevenson, M. (2021). Systematic review and discussion of production control systems that emerged between 1999 and 2018. *Production Planning & Control*, 32(7), 511–525.
- Bertolini, M., Braglia, M., Romagnoli, G., & Zammori, F. (2013). Extending value stream mapping: the synchro-MRP case. *International Journal of Production Research*, 51(18), 5499–5519.
- Bertolini, M., Romagnoli, G., & Zammori, F. (2015). Simulation of two hybrid production planning and control systems: A comparative analysis. *6th IESM Conference*.
- BLACKSTONE, J. H., PHILLIPS, D. T., & and, G. L. H. (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.
- Camargo, A., Correia, D., Oliveira, M., Lima, R., & Camargo, L. (2023). Comparison of pull management policies for a divergent process with DDMRP buffers: an industrial case study. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 33, 8022–8042.
- Chong, M. Y., Prakash, J., Ng, S. L., Ramli, R., & Chin, J. F. (2016). Parallel Kanban-CONWIP system for batch production in electronics assembly.

- International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 23(1), 35–50.
- Felberbauer, T., Altendorfer, K., & Hübl, A. (2012). Using a scalable simulation model to evaluate the performance of production system segmentation in a combined MRP and kanban system. Em C. Laroque, J. Himmelspach, R. Pasupathy, O. Rose & A. Uhrmacher (Eds.), *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*.
- Fernandes, N. O., Almeida, J., Ferreira, L. P., Ávila, P., & Carmo-Silva, S. (2025). Combining DDMRP and CONWIP: A Simulation Study of the Pool-Sequencing Rule. Em *Innovations in Industrial Engineering IV* (pp. 117–127).
- Fernandes, N. O., Thürer, M., Lima, R. M., & Stevenson, M. (2022). Factors for choosing production control systems in make-to-order shops: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 60(4), 1247–1267.
- Fernandes, N. O., & do 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.
- 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.
- Frazeo, T., & Standridge, C. (2016). CONWIP versus POLCA: A comparative analysis in a high-mix, low-volume (HMLV) manufacturing environment with batch processing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(2), 432–449.
- Gaury, E., Pierreval, H., & Kleijnen, J. (2000). An evolutionary approach to select a pull system among Kanban, Conwip and Hybrid. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(2), 157–167.
- Goldratt, E. M. (1990). *What is this thing called THEORY OF CONSTRAINTS and how should it be implemented?* North River Press.
- Gonçalves, J. F. (2006). *Gestão de Aprovisionamentos: Stocks. Revisão. Compras*. Publindústria.
- González-R, P. L., Framinan, J. M., & Pierreval, H. (2012a). Token-based pull production control systems: an introductory overview. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 5–22.
- González-R, P. L., Framinan, J. M., & Pierreval, H. (2012b). Token-based pull production control systems: an introductory overview. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), 5–22.
- Gstettner, S., & Kuhn, H. (1996). Analysis of Production Control Systems: Kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*, 34(11), 3253–3274.

- Gupta, M., & Snyder, D. (2009). Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3705–3739.
- H. Jodlbauer, A. H. (2008). Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. *International Journal of Production Research*, 2179–2195.
- Hadas, L., & Cyplik, P. (2007). The hybrid MRP/TOC system in make-to-order company - case study. *LINDI 2007. International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, 59–64.
- Herrera Vidal, G. (2023). Deterministic and Stochastic Inventory Models in Production Systems: a Review of the Literature. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7, 29–50.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (1996). *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*. Irwin.
- Jaegler, Y., Jaegler, A., Burlat, P., Lamouri, S., & Trentesaux, D. (2018). The ConWip production control system: a systematic review and classification. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5736–5757.
- Jakob Grönwall, H. S. (2017). *An Empirical Analysis Explaining the Challenges of Using a CONWIP System* [tese de mestrado, KTH Industrial Engineering e Management].
- Jiang, W., & Han, J. (2009). The Methods of Improving the Manufacturing Resource Planning (MRP II) in ERP. *2009 International Conference on Computer Engineering and Technology*, 383–389.
- Josefsson, J. (2014). Comparing JIT and TOC: A Comparison Regarding Methodology and Performance.
- Kasemset, C. (2011). A review on quality improvement and Theory of Constraints (TOC), 327–330.
- Khojasteh-Ghamari, Y. (2009). A performance comparison between Kanban and CONWIP controlled assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(6), 751–760.
- Khojasteh-Ghamari, Y. (2018). Developing a framework for performance analysis of a production process controlled by Kanban and CONWIP. *International Journal of Production Research*, 56(10), 3504–3524.
- King, P. L. (2011). Understanding Safety Stock and Mastering Its Equations. *APICS Magazine*, 21(4), 33–36.
- Koh, S.-G., & Bulfin, R. L. (2004). Comparison of DBR with CONWIP in an unbalanced production line with three stations. *International Journal of Production Research*, 42(2), 391–404.
- Kortabarria, A., Apaolaza, U., Lizarralde, A., & Amorrortu, I. (2018). Material Management without Forecasting: From MRP to Demand Driven MRP. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(4), 632–644.

- Krishnamurthy, A., Suri, R., & Vernon, M. (2004). Re-Examining the Performance of MRP and Kanban Material Control Strategies for Multi-Product Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 16, 123–150.
- Kumar, C. S., & Panneerselvam, R. (2007). Literature review of JIT-KANBAN system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 393–408.
- 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.
- Li, J.-W. (2011). Comparing Kanban with CONWIP in a make-to-order environment supported by JIT practices. *International Journal of Production Research*, 49(14), 4195–4210.
- Lin, C. J., Chen, F. F., & Chen, Y. M. (2013). Knowledge kanban system for virtual research and development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 119–134.
- Manikas, A., Gupta, M., & Boyd, L. (2015). Experiential exercises with four production planning and control systems. *International Journal of Production Research*, 53(14), 4206–4217.
- Meyr, H., & Wagner, M. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics*, 103(3), 703–720.
- Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., & Milian, B. (2015). MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison. *6th IESM Conference*.
- Missbauer, H., & Uzsoy, R. (2019). Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 4858–4872.
- Munyaka, J. B., & Yadavalli, V. S. S. (2022). Inventory management concepts and implementations: a systematic review. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(2), 15–36.
- Osuizugbo, I. C. (2020). Improving the Performance of Building Construction Firms through Addressing the Gap of Building Production Management: A New Production Model Approach. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 10(1), 50–63.
- Pibernik, R. (2006). Design of self-regulating production control systems by Trade-offs Programming. *International Journal of Production Economics*, 104(1), 385–397.
- Prakash, J., & Chin, J. F. (2014). Implementation of hybrid parallel kanban-CONWIP system: A case study. *Cogent Engineering*, 1(1), 938922.

- Ptak, C. A., & Smith, C. (2011). *Orlicky's Material Requirements Planning* (3rd). McGraw-Hill Education.
- Rădășanu, A. C. (2016). Inventory Management, Service Level and Safety Stock. *Journal of Public Administration, Finance and Law*, (9), 145–153.
- Rahman, S.-u. (1998). Theory of Constraints: A Review of Its Philosophy and Its Applications. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(4), 336–355.
- Riezebos, J. (2010). Design of POLCA material control systems. *International Journal of Production Research*, 48(5), 1455–1477.
- Sato, R., & Khojasteh-Ghamari, Y. (2012). An integrated framework for card-based production control systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(3), 717–731.
- Setyadi, H. A., Amin, B. A., & Widodo, P. (2024). Implementation Economic Order Quantity and Reorder Point Methods in Inventory Management Information Systems. *Journal of Information Systems and Informatics*, 6(1), 103–117.
- Shah, P. S. (2018). A Hybrid MRP-JIT Production Planning and Control System. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, 8(12), 29–37.
- Şimşit, Z. T., Günay, N. S., & Vayvay, Ö. (2014). Theory of Constraints: A Literature Review. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 930–934.
- Soares, C., Pereira, G., Ramos, J., Ramalho, R., Santos, A. S., Varela, L., Bastos, J., & Ávila, P. (2024). Recent developments in enterprise resource planning: a literature review. *Unpublished manuscript*.
- Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. (1990). CONWIP: A Pull Alternative to Kanban. *International Journal of Production Research*, 28(5), 879–894.
- Spearman, M. L., & Zazanis, M. A. (1992). Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons. *Operations Research*, 40(3), 521–532.
- 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.
- 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. *The International Journal of Production Research*, 15(6), 553–564.
- Suri, R. (1998). *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. Productivity Press.
- Techt, U. (2015). *Goldratt and the Theory of Constraints: The Quantum Leap in Management*. Ibidem Press.

- Thürer, M., Fernandes, N. O., Carmo-Silva, S., & Stevenson, M. (2017). Improving performance in POLCA controlled high variety shops: An assessment by simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, *43*, 1–11.
- Thürer, M., Fernandes, N. O., Haeussler, S., & Stevenson, M. (2023). Dynamic planned lead times in production planning and control systems: does the lead time syndrome matter? *International Journal of Production Research*, *61*(4), 1268–1282.
- Thürer, M., Fernandes, N. O., & Stevenson, M. (2019). Centralised vs. decentralised control decision in card-based control systems: comparing kanban systems and COBACABANA. *International Journal of Production Research*, *57*(5), 1438–1450.
- Thürer, M., Fernandes, N. O., & Stevenson, M. (2020). Material Flow Control in High-Variety Make-to-Order Shops: Combining COBACABANA and POLCA. *Production and Operations Management*, *29*(9), 2138–2152.
- Thürer, M., Fernandes, N. O., & Stevenson, M. (2022). Production planning and control in multi-stage assembly systems: an assessment of Kanban, MRP, OPT (DBR) and DDMRP by simulation. *International Journal of Production Research*, *60*(3), 1036–1050.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Protzman, C. W. (2015). COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure flow shop? *International Journal of Production Economics*, *166*, 143–151.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Silva, C. (2011). Three Decades of Workload Control Research: A Systematic Review of the Literature. *International Journal of Production Research*, 1–33.
- Tomaszewska, K. (2023). Comparative Simulation of the Production Flow with the Implementation of Kanban and DBR. *Management and Production Engineering Review*, *14*(2), 79–87.
- Van Vliet, A., Fransoo, J. C., & de Kok, T. (2000). A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *International Journal of Production Research*, *58*(13), 4111–4136.
- Velasco Acosta, A. P., Mascle, C., & Baptiste, P. (2020). Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, *58*(14), 4233–4245.
- Viana, D. D., Formoso, C. T., & Bataglin, F. S. (2021). Requirements for developing production planning and control systems for engineer-to-order industrialized building systems. *Journal of Construction Engineering and Management*, *147*(7), 04021070.
- Viana, D. D., Formoso, C. T., & Bataglin, F. S. (2022). Requirements for developing production planning and control systems for engineer-to-order industrialized

- building systems. *Construction Management and Economics*, 40(7–8), 638–652.
- Watson, K. J., & Patti, A. (2008). A comparison of JIT and TOC buffering philosophies on system performance with unplanned machine downtime. *International Journal of Production Research*, 46(7), 1869–1885.
- Wuttipornpun, T., & Yenradee, P. (2007). Performance of TOC based finite capacity material requirement planning system for a multi-stage assembly factory. *Production Planning and Control*, 18(8), 703–715.
- Zijm, W. (2000). Towards intelligent manufacturing planning and control systems. *OR Spektrum*, 22(3), 313–345.