



Estudo Comparativo da Metodologia MRP e DDMRP com Base na Simulação

NÉLSON DA SILVA GUEDES

novembro de 2022

ESTUDO COMPARATIVO DOS SISTEMAS MRP E DDMRP COM BASE NA SIMULAÇÃO

Nelson Da Silva Guedes

Estudante n.º 1980231

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

ESTUDO COMPARATIVO DO SISTEMA MRP E DDMRP COM BASE NA SIMULAÇÃO

Nelson Da Silva Guedes

Estudante n.º 1980231

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Prof. Doutor Luís Pinto Ferreira e coorientação do Prof. Doutor Nuno Octávio Fernandes.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira e ao Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes pela orientação e por todo o tempo despendido na passagem de conhecimentos, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

À minha família pelo apoio incondicional que me deram e dão e por terem estado sempre ao meu lado durante este percurso. E agradeço aos amigos que fiz ao longo do meu percurso académico.

Obrigado.

página propositadamente em branco

RESUMO

PALAVRAS CHAVE

DDMRP; MRP; Simulação de eventos discretos

Para assegurar a entrega dos produtos encomendados de acordo com o programado, em respeito pelos prazos de entrega acordados com os clientes, em condições de volatilidade dos mercados e flutuações na procura, os sistemas de Planeamento e Controlo da Produção assumem particular relevância.

Diversos sistemas de planeamento e controlo da produção têm sido desenvolvidos e propostos na literatura, sendo um dos mais conhecidos o MRP – *Materials Requirements Planning*. Recentemente surgiu uma alternativa a este sistema designada de DDMRP – *Demand Driven Material Requirements Planning*. O sistema DDMRP permite lidar com a variabilidade da procura, ajustando dinamicamente os níveis de stock dos buffers de desacoplamento de forma a proporcionar níveis elevados de serviço ao cliente.

Este estudo visa comparar e avaliar o desempenho destes dois sistemas, MRP E DDMRP, usando a simulação de eventos discretos. Para tal foi desenvolvido um modelo de simulação em Arena de um sistema de produção multi-estágio, onde a procura de componentes depende da procura de produtos finais.

Os resultados obtidos mostram um desempenho superior do sistema DDMRP relativamente ao MRP, em termos de nível de serviços, permitindo concluir sobre o impacto de diversos parâmetros, nomeadamente das regras de despacho usadas para priorizar as ordens de produção no espaço fabril.

ABSTRACT

KEYWORDS

DDMRP; MRP; Discrete event simulation

Production Planning and Control systems are of particular important to ensure the delivery of the ordered products according at the wright time in conditions of market volatility and fluctuations in demand.

Several production planning and control systems have been developed and proposed in the literature, being MRP – Materials Requirements Planning one of the best known. Recently, an alternative to this system named DDMRP – Demand Driven Material Requirements Planning has been proposed. The DDMRP makes possible to deal with the demand variability, by dynamically adjusting stock levels at decoupling buffers in order to provide high customer service levels.

This study aims to compare and evaluate the performance of these two systems, MRP and DDMRP, using discrete event simulation. For this, a simulation model was developed in Arena of a multi-stage production system, where the demand for components depends on the demand for final products.

The results obtained show a superior performance of the DDMRP system in relation to the MRP, allowing to conclude on the impact of several parameters of its performance, namely the dispatch rule used to prioritize production orders on the shop floor.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos de investigação.....	2
1.3. Opções Metodológicas.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Sistemas de Planeamento e Controlo da Produção	4
2.2. Demand Driven Material Requirements Planning- DDMRP.....	6
2.3. Análise Crítica da Revisão da Literatura	8
3. ESTUDO EXPERIMENTAL	13
3.1. Estudo de Simulação	13
3.2. Sistema de Produção.....	13
3.3. Modelo de Simulação.....	14
3.4. Regras de despacho.....	17
3.5. Plano experimental e Medidas de desempenho.....	18
4. Resultados e Análise	20
4.1. DDMRP: impacto dos parâmetros.....	20
4.2. DDMRP: impacto da regra de despacho	21
4.3. MRP: impacto dos parâmetros.....	22
4.4. DDMRP vs. MRP.....	24
5. Conclusões e propostas de trabalho futuro.....	26
5.1. Conclusões.....	26
5.2. Propostas de Trabalho Futuro.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
Apêndice A – CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO	30
Apêndice B – PONTO DE ENCOMENDA.....	31

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do DDMRP (Adaptada de Ptak & Smith (2016)).	6
Figura 2 - Buffers e Lead Time de desacoplamento(Adaptada de Ptak & Smith (2018), p66).....	7
Figura 3 - Zonas de Amortecimento do Buffer (Ptak & Smith, 2016).....	7
Figura 4 - Fração do modelo em Arena da simulação MRP	14
Figura 5 - Ilustração do sistema MRP usado.	15
Figura 6 - Ilustração do sistema DDMRP usado.	16
Figura 7 - Modelação do sistema MRP no simulador Arena	16
Figura 8 - Modelação do sistema DDMRP no simulador Arena	17
Figura 9 - WIP vs. Nível de Serviço	24
Figura 10 - FGI vs. Nível de Serviço.....	24

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de artigos que abordam o sistema DDMRP	9
Tabela 2 - Produtos finais e estrutura da linha de produção.....	13
Tabela 3 - Resultados da Simulação DDMRP para a regra FCFS.....	20
Tabela 4 - Resultados da Simulação do DDMRP para a regra EAD	21
Tabela 5 - Resultados da Simulação do DDMRP para a regra LNFP.....	22
Tabela 6 - Resultados Simulação do sistema MRP para a regra EAD.....	23

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ADU	Average Diary Utilization
BOM	Bill of Materials
CWT	Customer Waiting Time
DBR	Drum-Buffer-Rope
DDMRP	Demand Driven Material Requitements Planning
DLT	Decoupled Lead Time
DT	Time Delivery
DD	Due Date
EAD	Earliest Authorization Date
FGI	Finished goods inventory
FCFS	First-Come First-Serve
JIT	Just-In-Time
LTF	Lead Time Factor
LNFP	Lowest Net Flow Position
MRP	Material Requirements Planning
MRPII	Manufacturing Resource Planning
MOQ	Minimal Order Quantity
NFP	Net Flow Position
PAF	Planned Adjustment Factor
PPC	Production Planning and Control
ROQ	Re-order Quantity
ROP	Re-order Point
RPB	Row Parts Buffer
SL	Service Level
SS	Safety Stock
TTT	Total Throughput Time
TT	Throughput Time
TFGI	Time in Finished Goods Inventory
VF	Variation Factor
WIP	Work In Progress
WIP	Work-in-Process
WIP	Work-in-Process

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

No primeiro capítulo desta dissertação é apresentado o enquadramento e motivação do trabalho, bem como os principais objetivos, as questões de investigação e metodologia aplicada no desenvolvimento deste.

1.1. Contextualização

Nas últimas décadas as supply chains tornaram-se mais competitivas (MacCarthy, Blome, Olhager, Srai & Zhao, 2016). Neste contexto, autores como Ptak & Smith, (2011) consideram importante garantir uma produção ajustada (i.e., orientada) à procura, de forma a lidar com a volatilidade dos mercados e flutuações na procura e com a procura de produtos cada vez mais customizados.

Para assegurar a entrega dos produtos encomendados de acordo com o programado, em respeito pelos prazos de entrega acordados com os clientes, em condições de volatilidade dos mercados e flutuações na procura, os sistemas de Planeamento e Controlo da Produção (PPC – Production Planning and Control) assumem particular relevância. Diversos sistemas de PPC têm sido desenvolvidos e propostos na literatura. Um sistema de PPC bastante conhecido e usado pelas empresas industriais é o Material Requirements Planning (MRP). Trata-se de sistema Push que implementa a abordagem de programação regressiva a partir das datas de entrega dos produtos finais, para determinar as datas de lançamento em produção, ou de compra, para cada um dos componentes que integram o produto final, levando em consideração as quantidades existentes em armazém. Contudo, o sistema MRP é guiado não só por encomendas, mas também por previsões, que por inerência envolvem erro. O MRP é ainda baseado na suposição de que os prazos de produção e de entrega (lead times) são determinísticos e fixos, i.e., independentes da carga que existe no sistema (Louly et al., 2012). Um dos que recebeu mais atenção por parte de investigadores e gestores é talvez o sistema Kanban desenvolvido pela Toyota (Liker & Meier, 2006). Este sistema assume uma produção orientada à procura pela aplicação do princípio Pull. Os sistemas Pull caracterizam-se por autorizar ordens de produção de acordo com o estado do sistema, apesar desta vantagem, uma das grandes vulnerabilidades do sistema Kanban é o reabastecimento de stocks. Uma outra abordagem ao PPC também bastante conhecida e usada é Drum-Buffer-Rope (DBR), o qual foi desenvolvido no âmbito da Teoria das Restrições (Simons & Simpson, 2009). Este sistema coloca o foco nos recursos que restringem o sistema, i.e., os bottleneck, não levando em consideração a estrutura do produto (BOM – Bill of Materials) na colocação de buffers.

Considerando as debilidades de cada um destes sistemas de PPC, Ptak & Smith, (2011) propõem uma nova abordagem conhecida como Demand Driven Materials Requirements Planning (DDMRP). Esta abordagem procura ajustar (i.e., orientar) a produção à procura, combinando os benefícios de cada um destes três sistemas, DBR, MRP e Kanban, no controlo da produção. Neste novo sistema, os níveis dos stocks são ajustados dinamicamente, tendo em consideração a volatilidade da procura resultante de aspetos como promoções, sazonalidade, produtos em crescimento etc. Assim, o

DDMRP pode ser visto como uma resposta para lidar com a volatilidade do mercados e a variabilidade da procura (Kortabarria et al., 2018).

1.2. Objetivos de investigação

Pretende-se neste trabalho comparar o desempenho dos sistemas de controlo da produção DDMRP e MRP num ambiente de produção multi-estágio onde a procura de componentes é dependente da procura de produtos finais. Em particular pretende-se analisar o impacto dos diferentes parâmetros do sistema DDMRP no seu desempenho, em comparação com o desempenho do sistema MRP.

As questões de investigação que se procura responder no âmbito deste trabalho são os seguintes :

- Qual o desempenho dos sistemas DDMRP e MRP no sistema em questão?
- De que forma os parâmetros do sistema DDMRP influenciam o seu desempenho?

Nesse sentido podem ser considerados os seguintes objetivos intermédios com vista ao trabalho a levar a cabo:

- Revisão da literatura nos sistemas de controlo da produção MRP e DDMRP no ambiente de produção por encomenda.
- Identificação dos principais parâmetros operacionais do sistema DDMRP, procurando estimar o impacto que estes poderão ter no seu desempenho;
- Desenvolvimento dos modelos de simulação que permitam o estudo comparativo destes dois sistemas;
- Implementação de um plano experimental e análise dos resultados de simulação.

1.3. Opções Metodológicas

Para responder às questões de investigação acima levantadas, foi usada a simulação. A simulação é particularmente útil para estudar sistemas complexos, como o considerado no estudo, considerando o impacto da incerteza e variabilidade no desempenho do sistema, o que não é geralmente tratável com modelos matemáticos analíticos.

O software de simulação usado foi o Arena. O Arena é um software de simulação de eventos discretos que permite comparar o desempenho dos sistemas de planeamento e controlo da produção MRP e DDMRP em estudo em contextos de produção reais ou hipotéticos.

Neste estudo é considerado um sistema de produção hipotético baseado em Thurer et al. (2022) e (Jodlbauer & Huber, 2008) representativo de um ambiente multiproduto e multi-estágio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No segundo capítulo desta dissertação são apresentadas diferentes abordagens ao planeamento e controlo da produção (PPC). Na secção 2.1 são abordados os sistemas de PPC nos quais o DDMRP é baseado, enquanto na secção 2.2 é detalhado o sistema DDMRP abordando os aspetos de design e operacionais do mesmo. Por fim, a secção 2.3 é realizada uma análise crítica da revisão da literatura em estudos desenvolvidos no âmbito do DDMRP.

2.1. Sistemas de Planeamento e Controlo da Produção

De uma forma geral as empresas procuram a satisfação dos clientes, entre outros aspetos, pela redução dos prazos de entrega e pela entrega atempada, i.e., dentro do prazo acordado. Para tal é necessário gerir os recursos produtivos de forma eficaz e eficiente.

Para cumprir com este objetivo é importante controlar o trabalho em curso de fabrico (WIP- work-in-process), minimizando as filas de espera no espaço fabril e consequentemente reduzindo os prazos de produção e de entrega ao cliente. Neste âmbito os sistemas de controlo da produção assumem particular relevância (Abuhilal et al., 2006), tendo diferentes abordagens sido propostas na literatura. Três das mais conhecidas são as seguintes:

- Material Requirements Planning (MRP)
- Just In time (JIT), Kanban
- Teoria das Restrições (TOC), Drum-Buffer-Rope (DBR)

O sistema MRP foi inicialmente proposto por Orlicky em 1975 para permitir determinar o que produzir, quanto produzir e quando produzir de cada um dos componentes que integram a lista de materiais ou bill of materials (BOM) do produto final. Posteriormente foi alargado para o Manufacturing Resource Planning (MRPII) para incluir aspetos como o planeamento de capacidade, procurando que os produtos sejam entregues dentro dos prazos ou adequadas de acordo com capacidade produtiva disponível.

O MRP II é guiado pelo Master Production Schedule (MPS) que leva em consideração não só as encomendas, mas também previsões da procura de produtos finais. Contudo, como o MRP torna a procura de todos os itens ou componentes na BOM dependente da procura de produtos finais, isto pode criar “nervosismo” no sistema e resultar no chamado efeito chicote (Ptak & Smith, 2011). Para lidar com isto, e absorver a variabilidade, são usualmente usados stocks de segurança.

O sistema Kanban é parte integrante do JIT (Liker & Meier, 2006) tendo sido desenvolvido pela Toyota. Este está inerentemente ligado ao sistema ponto de encomenda ou re-order point (Shingo & Bodek, 2019). O sistema Kanban usa stocks em cada estágio do sistema produtivo e “supermercados” para cada componente comprado. A principal diferença entre os stocks e os

supermercados é que os primeiros são colocados ao nível dos recursos, enquanto os segundos são colocados ao nível dos itens (BOM). Ambos são reabastecidos de acordo com sinais proporcionados por cartões Kanban. Ao contrário do MRP, o kanban torna tudo independente e os recursos apenas necessitam de atender a sinais proporcionados pelos cartões kanban para determinar se devem produzir ou não.

O sistema DBR desenvolvido por Goldratt(1984) no âmbito da TOC coloca a ênfase nos recursos que restringem o sistema, designados de *bottlenecks*, os quais ditam o ritmo (*drum*) de produção do sistema produtivo. Este ritmo é comunicado a montante (*rope*) de forma a garantir que os recursos que aí se encontram trabalham ao ritmo do *bottleneck*, evitando stocks desnecessários. Ou seja, a montante do *bottleneck* é implementada uma abordagem *pull*, funcionando o DBR de forma semelhante ao sistema Kanban. De forma a proteger os recursos *bottleneck* e evitar potenciais paragens destes por falta de abastecimento são usados *buffers*, podendo estes ser definidos em tempo ou em material (Thürer et al., 2018). A jusante do *bottleneck* é implementada uma abordagem *push*, funcionando o DBR de forma semelhante ao sistema MRP.

Estes sistemas de planeamento e controlo da produção apresentam, contudo, algumas limitações segundo Ptak & Smith (2011), nomeadamente:

- O MRP implementa uma lógica *push* de “empurrar a produção” para o mercado, tendo sido desenvolvido numa era em que os mercados eram tolerantes com longos prazos de entrega. Isto significa que o cliente teria de ser tolerante com o *lead time* acumulado da produção, resultante da BOM, e da aquisição de componentes e ou materiais junto dos fornecedores. Com a característica de tornar tudo dependente da procura de produtos finais, a única forma de ter prazos de entrega razoáveis, consiste em guiar o MRP por previsões. Contudo, as previsões envolvem erro, o que resulta por um lado na produção de produtos desnecessários e/ou no momento inapropriado e por outro na necessidade de constantes ajustes, à medida que a procura real é conhecida. Estes constantes ajustes à procura de produto final, resultam por sua vez em constantes ajustes na procura dos diversos componentes que integram a BOM, um fenómeno conhecido por “nervosismo”.
- O JIT refere-se à produção de itens ou componentes, pelos diversos processos produtivos, no momento e nas quantidades estritamente necessárias à produção do produto final (Sugimori et al. 1997). Neste contexto o stock é considerado desperdício, pelo que o JIT procura reduzir os níveis de stock. Isto é feito pela utilização do sistema Kanban, o qual implementa uma abordagem *pull*. Contudo, a redução excessiva de stocks pode tornar a *supply chain* mais frágil e menos ágil em condições de volatilidade da procura e de abastecimento.
- A TOC coloca o foco nos recursos *bottleneck*, usando para tal o sistema DBR. Contudo, não considera a explosão resultante da lista de materiais (BOM), tendo dificuldade em lidar com estruturas BOM complexas, tipicamente com dois ou mais níveis.

2.2. Demand Driven Material Requirements Planning- DDMRP

O DDMRP foi introduzido por Ptak & Smith (2011) o PPC combina elementos das três abordagens ao planeamento e controlo da produção acima descritas: MRP, JIT e TOC.

O objetivo do sistema DDMRP passa por comprimir o Lead Time (LT) ou prazo de produção, alinhando a produção com a procura. Isso inclui a sincronização do planeamento e execução com o consumo de material. Tal estratégia incentiva as empresas a centralizar a procura em vez do stock, de forma a lidar com alterações do mercado e a tornarem-se mais ágeis (Ptak & Smith, 2011).

De acordo com os autores do DDMRP este é composto por cinco fases, como ilustrado na Figura 1. As três primeiras fases determinam a configuração do sistema, enquanto as fases seguintes definem os aspetos operacionais, envolvendo o planeamento e execução. O planeamento refere-se ao processo de gerar ordens de produção ou de compra, dependendo se o item é comprado ou produzido e o segundo ao processo de executar/ acompanhar estas ordens de forma a proteger e a promover o fluxo.

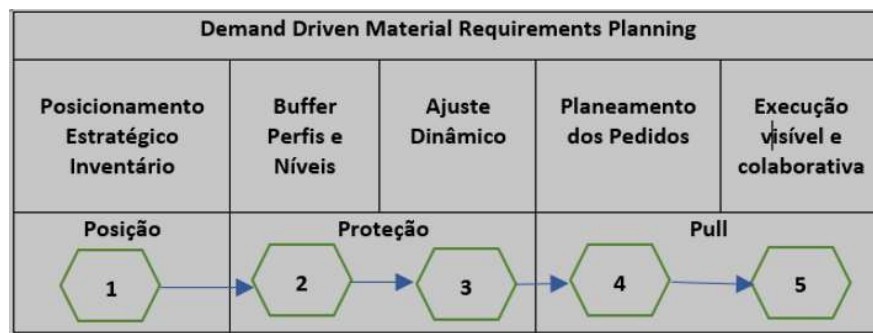


Figura 1 - Fases do DDMRP (Adaptada de Ptak & Smith (2016)).

A primeira fase do sistema DDMRP consiste no posicionamento estratégico do stock. Esta decisão está relacionada com a criticidade do stock. A ideia é identificar quais os itens da lista de materiais (BOM) a manter em stock de forma a reduzir os tempos de resposta ao mercado e em simultâneo lidar com a variabilidade da procura. Para os itens críticos na lista de materiais, são criados buffers (i.e., stocks), tal como no sistema Kanban. Contudo, ao contrário do Kanban, que introduz buffers para todos os itens ou componentes em todos os estágios produtivos, o DDMRP introduz buffers apenas nos itens críticos. Isto assegura que nem todas as alterações ao nível da procura de produtos finais se traduzem em alterações na procura de itens em níveis mais baixos da BOM, limitando o potencial “nervosismo” do sistema.

Na prática estes buffers funcionam como barreira à variabilidade, ajudando a comprimir o lead times.

Neste contexto surge o designado Lead Time de Desacoplamento (DLT), que diz respeito ao maior lead time não protegido (sem buffers) na lista de materiais, a figura 2 ilustra o conceito do DLT.

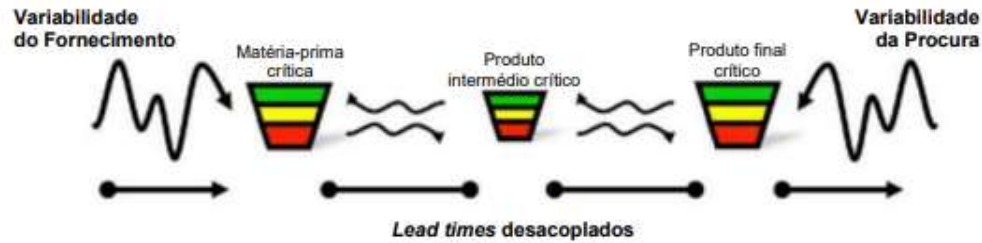


Figura 2 - Buffers e Lead Time de desacoplamento (Adaptada de Ptak & Smith (2018), p66).

A segunda fase (Ptak & Smith, 2016) está relacionada com níveis de stock a usar em cada buffer. O objetivo passa por dimensionar o stock de forma a resultar num determinado nível de proteção, tendo em consideração que mais stock resulta em menos probabilidade de rutura, mas representa um custo maior em capital investido, materiais e espaço de armazenamento, além do risco de obsolescência, entre outros que compõem o designado custo de posse de stock. Para tal DDMRP considera três zonas de amortecimento (Green-verde, Yellow-amarelo e Red-vermelho), cada uma com uma função específica, como ilustrado na Figura 3.

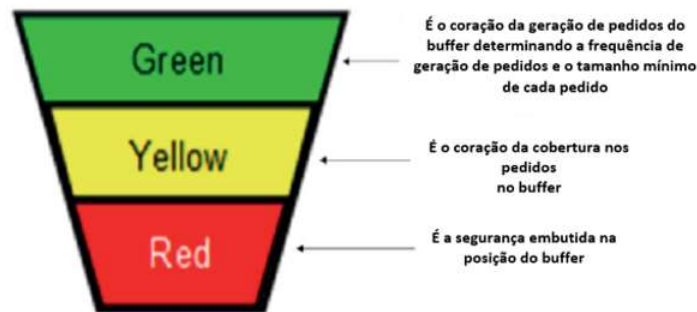


Figura 3 - Zonas de Amortecimento do Buffer (Ptak & Smith, 2016)

O Lead time de desacoplamento (DLT), o uso médio diário (ADU – Average Daily Use), a quantidade mínima da ordem de compra ou de produção (MOQ – Minimum Order Quantity), o fator de Lead Time (LTF) e o Fator de Variabilidade (VF) são usados para dimensionar cada zona, da seguinte forma:

$$\text{Zona amarela} = \text{ADU} \cdot \text{DLT} \quad (1)$$

$$\text{Zona vermelha} = \text{zona amarela} \cdot \text{LTF} \cdot (1 + \text{VF}) \quad (2)$$

$$\text{Zona verde} = \text{MAX}(\text{MOQ}, \text{zona amarela} \cdot \text{LTF}, \text{ADU dias de ciclo da ordem}) \quad (3)$$

A soma de (2) com (1) é chamada de Top Of Yellow (TOY), e a soma das zonas (1), (2) e (3) é o Top Of Green (TOG). A quantidade total do buffer corresponde, portanto, ao somatório das três zonas.

LTF e VF servem para lidar com situações de lead times longos/ curtos e de variabilidade elevada/baixa e recomendam-se três categorias (curto, médio e longo) para a seleção do LTF. Por exemplo para produtos com lead time curto o LTF pode estar entre 20% e 40%. Da mesma forma, o VF é escolhido como base três categorias (baixa, média e alta) de acordo com a variabilidade (conhecida por exemplo por experiência).

A terceira fase, refere-se ao ajuste dinâmico (Ptak & Smith, 2016), cada buffer é ajustado ao longo do tempo para lidar com a eventual variação da procura, por exemplo devido ao efeito da sazonalidade. Consiste em usar um Fator de Ajuste Planeado (PAF) da seguinte forma:

$$ADU = ADU * PAF \quad (4)$$

A quarta fase, planejamento orientado pela procura (Ptak & Smith, 2016), refere-se à colocação de ordens de compra ou de produção, para reposição dos buffers usando a equação de fluxo líquido (NFP – Net Flow Position), definida da seguinte forma:

$$NFP = \text{Quantidade em Stock} + \text{Pedidos (open orders)} - \text{Procura} \quad (5)$$

De cada vez que o NFP cai para a zona amarela, ou zona vermelha, é gerada uma ordem, e a quantidade associada a essa ordem, a encomendar ou produzir, é igual ao TOG menos o NFP. Assim o buffer será reabastecido até o topo.

A quinta e última fase, Execução Visível e Colaborativa (Ptak & Smith, 2016) refere-se à gestão dos pedidos (open orders). O DDMRP incorpora alertas codificados por cores para proporcionar visibilidade e priorizar as ordens de produção no espaço fabril. Desta forma, as ordens podem ser priorizadas de acordo com o estado dos buffers, e não exclusivamente com base nas datas devidas de entrega (Ptak & Smith, 2016).

É particularmente este âmbito de priorização das ordens de produção que o presente trabalho aborda.

2.3. Análise Crítica da Revisão da Literatura

A revisão da literatura foi realizada com recurso à plataforma Scopus, foi elaborada uma pesquisa de artigos científicos com base na pesquisa das seguintes palavras-chave “DDMRP” e “MRP”. Foram considerados artigos após 2016, uma vez que o DDMRP foi introduzido no livro de Ptak & Smith lançado em 2016. Foi obtido como resultado da pesquisa no dia 07.03.2022 uma lista de 12 artigos, relativamente aos quais se apresenta uma breve descrição na tabela 1.

Estes artigos enfatizam os benefícios quantitativos do sistema DDMRP em relação aos sistemas MRP, Kanban e/ ou DBR.

Tabela 1 – Lista de artigos que abordam o sistema DDMRP

Referências Bibliográficas	Descrição do Trabalho
(Thürer et al., 2022)	Este artigo estuda e avalia os quatro sistemas: MRP, OPT, KANBAN e DDMRP. A conclusão a que chega é de que os sistemas OPT e DDMRP apresentam o melhor desempenho em bottleneck, sem bottleneck os melhores sistemas são o Kanban e DDMRP.
(Azzamouri et al., 2021)	Este artigo tem como objetivo analisar a avaliação temporal do DDMRP. As conclusões que retira é que os estudos existentes não são suficientes, e que este método DDMRP está longe de apresentar-se maduro.
(Pekarčíková et al., 2020)	Este artigo avalia o impacto nas cadeias de abastecimento na indústria 4.0 e o impacto em sistemas DDMRP.
(Orue et al., 2020)	Este artigo tem como objetivo investigar a padronização do processo de implantação do modelo DMRP. As conclusões a que chega é de que o sistema em análise apresenta um avanço capaz de responder aos novos paradigmas.
(Velasco Acosta et al., 2020a)	Este artigo avalia a aplicabilidade do DDMRP em ambiente fabril complexo. Implementa uma simulação em Arena. Os resultados apresentados reduzem o lead time em 41% e o stock em 18%.

(Dessevre et al., 2019)	<p>Este artigo estuda o efeito do DLT nos stocks. As conclusões a que chega é que o DDMRP tem um impacto elevado nas performances do sistema; o DLT no ajuste dinâmico do buffer reduz os stocks garantindo uma boa qualidade de serviço.</p>
(Pekarcíková et al., 2019)	<p>O objetivo desta publicação é desenvolver conhecimentos usando a abordagem DDMRP no contexto específico da Indústria 4.0 e validar esse conhecimento teórico com estudos de caso. As conclusões a que chega é de que o sistema DDMRP é controlado pelos sinais da procura de produtos.</p>
(Erraoui et al., 2019)	<p>Este artigo foca a alternativa de gestão DDMRP é feita uma comparação com os modelos Kanban/Lean e MRPII, apresentando dados positivos na avaliação do DDMRP.</p>
(Dessevre et al., 2019)	<p>Este artigo avalia o lead time de um flow shop segundo a Abordagem DDMRP, os resultados mostram que o ajuste dinâmico do tamanho de buffer reduz os stocks garantindo um bom serviço.</p>
(Kortabarria et al., 2018)	<p>Este artigo analisa os resultados quantitativos e qualitativos da transição de uma empresa industrial do MRP para o DDMRP. Os resultados sugerem fortemente que, ao usar o DDMRP, reduziu os níveis de stock (redução de 52,53%), enquanto o consumo de materiais aumentou (8,7%). Todos esses resultados são alcançados mantendo um alto nível de serviço.</p>

(Shofa et al., 2018)	Por meio de uma simulação de eventos discretos, os autores comparam o modelo MRP com o modelo DDMRP em casos de variabilidade na procura. O DDMRP melhora o nível de stock de 106.852 peças por dia para 95.284 peças por dia (redução de 11%) e torna o stock estável. Por causa disso, o DDMRP é mais eficaz no planeamento da produção do que o MRP.
(Miclo et al., 2016)	Este artigo apresenta uma comparação entre MRPII e o DDMRP, uma simulação de eventos DES; é avaliada a capacidade de adaptação do DDMRP à procura. As conclusões a que chega são o sistema MRPII apresenta melhor resposta, de realçar que a procura em estudo apresenta baixa variabilidade e sem picos.

Os artigos científicos apresentados na tabela 1 comparam o desempenho do DDMRP, em diferentes cenários e ambientes produtivos, com outros sistemas de controlo da produção, nomeadamente MRP, OPT e KANBAN.

Kortabarria et al. (2018), Shofa et al. (2018) e Miclo et al. (2016) recorrem à simulação de eventos discretos para comparar o MRP com o DDMRP, sendo apresentados resultados em torno da vantagens do DDMRP aplicado aos processos industriais considerados.

Pekarčíková et al. (2020) e Pekarcíková et al. (2019) avaliam a implementação do DDMRP no contexto operacional da indústria 4.0 e o seu impacto nas cadeias de distribuição. Por outro lado, Orue et al. (2020) apresenta uma abordagem mais operacional no que respeita à padronização da implementação do DDMRP. Dessevre et al. (2019) aborda o ajuste dinâmico dos buffers.

Não parece, contudo, haver estudos que abordem a problemática da priorização das ordens de produção no contexto do sistema DDMRP. Parece também haver um deficit de estudos que abordem as vulnerabilidades do sistema DDMRP. Por fim, parece haver um consenso de que é importante estudar/ abordar mais aspetos práticos da implementação do DDMRP numa maior diversidade de ambientes fabris.

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição do plano experimental com a descrição do sistema de produção, modelo de simulação, regras de despacho e medidas de desempenho.

3.1. Estudo de Simulação

Com o objetivo de responder às questões de investigação atrás levantadas é apresentado neste capítulo um estudo de simulação no qual se compara o desempenho dos sistemas DDMRP e MRP, recorrendo ao software ARENA. O sistema de produção considerado é baseado em Thüerer et al. (2022) e (Jodlbauer & Huber, 2008).

3.2. Sistema de Produção

Embora o sistema de produção considerado seja baseado em Thüerer et al. (2022) e (Jodlbauer & Huber, 2008), as quantidades de cada produto/ componente foram ajustadas de acordo com o indicada na Tabela 2, permitindo criar uma situação de carga balanceada entre estações de trabalho.

O sistema considera uma linha de produção com 6 estações de trabalho, em que a estação 6 é a primeira na rota dos produtos e a estação 1 a última. Neste sistema são produzidos 8 produtos diferentes, os quais requerem a montagem de diferentes componentes, nas quantidades indicadas na Tabela.

Estação 1 (Final)	Estação 2		Estação 3		Estação 4		Estação 5		Estação 6 (estação inicial)	
	tipo	Quantidade	tipo	Quantidade	tipo	Quantidade	tipo	Quantidade	tipo	Quantidade
Produto 1	B1	2	C1	2	D1	1	E1	1	F1	1
Produto 2	B2	2	C1	2	D1	1	E1	1	F1	1
Produto 3	B3	2	C2	2	D2	1	E2	1	F2	1
Produto 4	B4	2	C2	2	D2	1	E2	1	F2	1
Produto 5	B1	2	C1	2	D1	1	E1	1	F1	1
Produto 6	B2	2	C1	2	D1	1	E1	1	F1	1
Produto 7	B3	2	C2	2	D2	1	E2	1	F2	1
Produto 8	B4	2	C2	2	D2	1	E2	1	F2	1

Tabela 2 - Produtos finais e estrutura da linha de produção

A procura de produtos finais segue uma distribuição estocástica de Poisson com média de 9 produtos a cada 10 unidades de tempo (horas), tendo todos os produtos a mesma probabilidade de serem solicitados pelo cliente. Nas estações de trabalho o tempo de processamento segue uma

distribuição de Erlang com média de 1 hora, à exceção das estações 1 e 2 em que o tempo médio é de 0.5 horas. A taxa média resultante de utilização das estações de trabalho (máquinas) é de 90%, sendo idêntica ao tipicamente considerado na literatura (e.g., Thüerer et al., 2022, Steele et al., 2007 e (Jodlbauer & Huber, 2008).

O sistema considerado envolve ainda os seguintes pressupostos:

- Todos os materiais (i.e. matérias-primas) requeridas na estação 6 encontram-se disponíveis e não são objeto de estudo;
- Os tempos de setup são independentes da sequência de processamento e estão incluídos nos tempos de processamento;
- As encomendas são satisfeitas apenas na data devida de entrega, o que significa que os produtos finais permanecem no buffer de produtos acabados (FGI) até que esta data seja vencida.

A cada produto é associada uma data devida de entrega aquando da sua entrada no sistema. Esta data é considerada como sendo definida internamente pela empresa, pela adição de uma folga fixa à data de entrada.

3.3. Modelo de Simulação

A figura 4 apresenta a estrutura do modelo da simulação, em Arena, usada para gerar a procura dos clientes e lançar as ordens em produção.

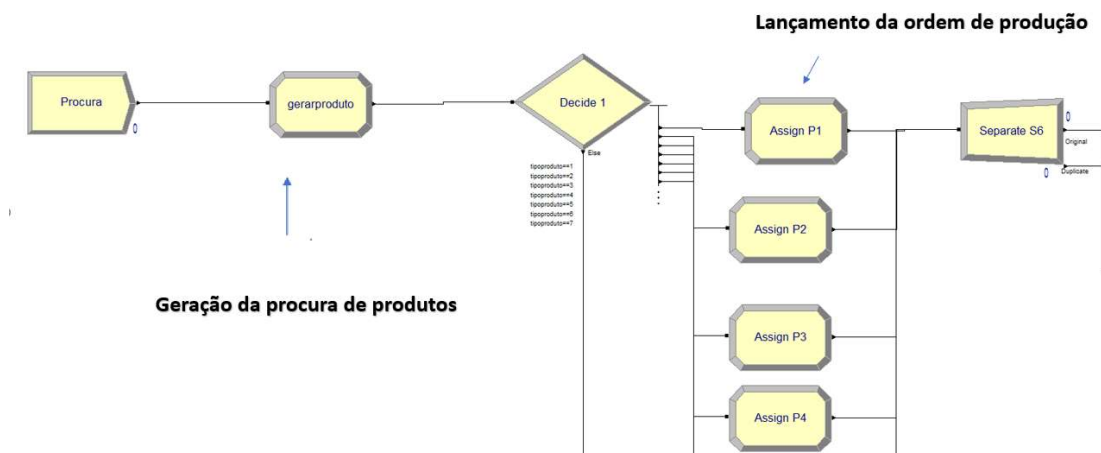


Figura 4 - Fração do modelo em Arena da simulação MRP

Ao entrar no sistema de produção, é definido para a ordem de produção o tipo de produto, a data devida de entrega (DD) e a data de autorização de produção em cada uma das estações de trabalho.

O tipo produto é definido da seguinte forma no software Arena:

$$DISC(1/8, 1, 2/8, 2, 3/8, 3, 4/8, 4, 5/8, 5, 6/8, 6, 7/8, 7, 1, 8) \quad (6)$$

A DD é definida da seguinte forma:

$$DD = TNOW + Folga \quad (7)$$

Onde $TNOW$ se refere á data de entrada da encomenda e a Folga ao tempo disponível até à entrega. A data de autorização é definida por programação regressiva a partir da data de entrega, da seguinte forma no software Arena:

$$ADATE_n = DD - TAVG(LTime_6) - TAVG(LTime_5) - TAVG(LTime_4) - TAVG(LTime_3) - TAVG(LTime_2) - TAVG(LTime_1) \quad (8)$$

Onde a $AVG(LTime)$ se refere ao tempo médio de percurso na estação n. Este tempo é diretamente medido no modelo.

Para controlo da produção são usados os sistemas MRP e o DDMRP, os quais estão esquematizados nas figuras 5 e 6, respetivamente, onde é apresentado o fluxo das ordens de produção.

No caso do MRP, a ordem de produção é enviada para a estação 6, sendo definido em cada uma das estações de trabalho uma data de autorização, i.e., de início de produção, através da seguinte expressão:

$$M_x(0, ADATE_n - TNOW) \quad (9)$$

No MRP é também associado a cada estação de trabalho um stock de segurança, SS. Este permite iniciar a ordem de produção na estação de trabalho na data de autorização quando a ordem de produção enviada para a estação 6 ainda não tenha chegado a esta estação.

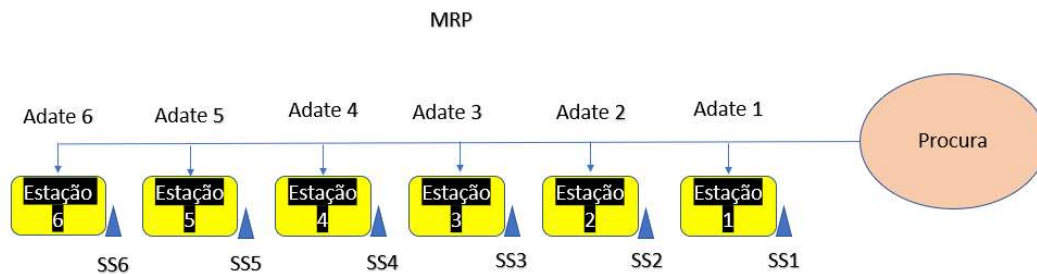


Figura 5 - Ilustração do sistema MRP usado.



Figura 6 - Ilustração do sistema DDMRP usado.

A figura 7 ilustra a implementação do sistema MRP no Arena. Nesta figura encontra-se a entrada das ordens de autorização de produção e a criação do stock de segurança para a estação 6 de produção, para as restantes estações é executado de igual forma.

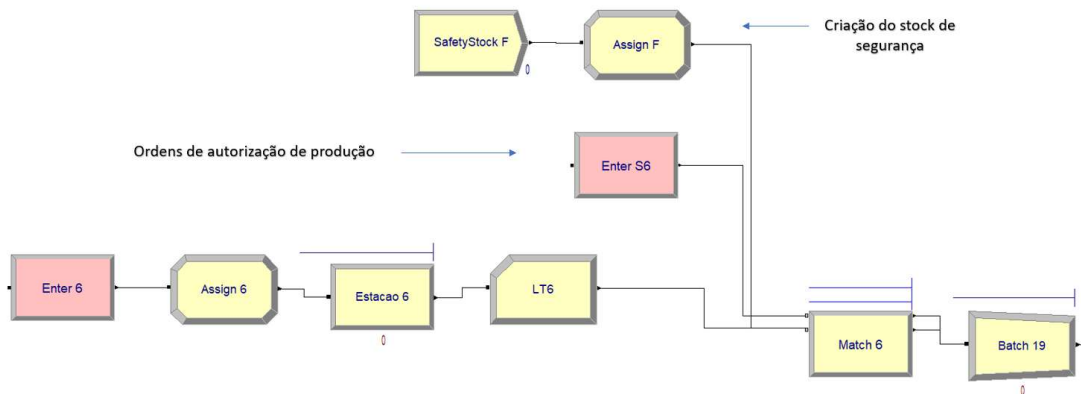


Figura 7 - Modelação do sistema MRP no simulador Arena

No sistema DDMRP assumiu-se, por simplicidade, a existência de dois buffers: o buffer de produto acabado (FGI- finished goods inventory) e o buffer de matérias-primas (RPB - raw parts buffer). A procura é colocada diretamente no FGI, quando é atingida a data devida de entrega, e satisfeita a partir daí. Sempre que o nível de stock atinge o ponto de encomenda (ROP) é colocada uma encomenda de uma quantidade fixa (ROQ) para produção. Ambos os parâmetros são alvo de experimentação no nosso estudo. A ordem de produção é colocada na estação 6, para se iniciar a produção do produto e repor o nível de stock no FGI, após processamento nas restantes estações.

No DDMRP, o reabastecimento do buffer é, portanto, função do ROP e do ROQ. Fazendo um paralelo com as fórmulas de cálculo definidas na seção da revisão da literatura, temos:

$$ROP = Yellow\ Zone + Red\ Zone = ADU \cdot DLT + SS \quad (10)$$

Em que SS se refere ao stock de segurança, que no nosso caso foi definido com base na abordagem tradicional (Schmidt et al., 2012):

$$SS = SF(SL) \quad (11)$$

Onde o SF é um fator de segurança dependendo do nível de serviço, SL é o nível de serviço, TT é o tempo de reabastecimento (throughput time), σ^2 é a variância da procura, D é a média da procura e σ é a variância do período de reabastecimento (DLT).

Tendo em consideração as equações 10 e 11, apresentam-se no apêndice A os cálculos efetuados para a obtenção do valor do ROP para cada produto.

Os valores de DLT e a variância foram baseados em simulações médias realizadas de forma preliminar. Nestes cálculos considerou-se ADU = 0,11, $\sigma^2 = 1$, DLT = 38,8, de forma a modelar a dificuldade prática de estabelecer o stock de segurança testou-se o SF a três níveis, nomeadamente: -0,5, 0, 0,5. Isto resultou em três valores para o ROP nomeadamente 3,4 e 5. O ROQ foi testado a dois níveis no nosso estudo, nomeadamente 1 e 4.

Fazendo um paralelismo com as fórmulas apresentadas na revisão da literatura:

$$ROQ = TOG - NFP \quad (12)$$

A figura 8 ilustra a implementação do sistema DDMRP no Arena. Nesta figura podemos observar o buffer de stock de produto acabado (FGI), representado pelo Match 1, e a entrada de autorizações com base na data de entrega para entrega do produto acabado ao cliente.

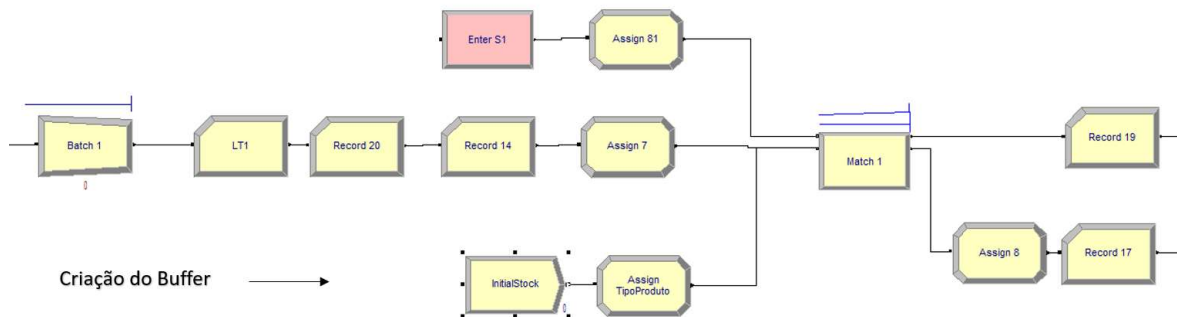


Figura 8 - Modelação do sistema DDMRP no simulador Arena

3.4. Regras de despacho

Para priorização das ordens de produção no espaço fabril são usadas regra de despacho. No estudo são consideradas três regras, nomeadamente First-Come-First-Served (FCFS), data mais cedo de autorização (EAD) e valor mais baixo de stock dado pela Net Flow Position (LNFP). As regras FCFS, EAD e LNFP são usadas no estudo do sistema DDMRP, enquanto o MRP é testado apenas com base na regra EAD usualmente adotada neste sistema.

3.5. Plano experimental e Medidas de desempenho

No estudo dos dois sistemas de controlo da produção foram usados planos experimentais distintos. No caso MRP foi testado o impacto do stock de segurança de cada tipo de produto. Neste caso foram testados os seguintes valores para o stock de segurança por produto: 3, 4 e 5, o que resulta num total de produtos em stock de:

- n_1 . stock segurança por produto; para a estação 1
- n_2 . stock segurança por produto; para a estação 2
- n_{3-6} . stock segurança por produto; para as estações 3 a 6.

Em que n_1 , n_2 e n_{3-6} se referem o número de tipos de produtos/ componentes nas estações 1, 2 e 3 a 6, respetivamente. Foram ainda testados dois níveis para o valor da folga da data de entrega (30 e 40 horas), resultando no plano experimental indicado na tabela 7, com um total de 12 cenários experimentais.

No caso do DDMRP foram testados três níveis para o ponto de encomenda ROP de cada produto (3, 4 e 5), dois níveis para a quantidade de encomenda ROQ (1 e 4), dois níveis para a folga da data de entrega (30 e 40) e três níveis para as regras de despacho (FCFS, EAD e LNFP). Isto resulta em 36 cenários experimentais, como indicado na tabela 5.

Para comparar o desempenho dos dois sistemas de controlo e o impacto dos parâmetros acima mencionados, foram usadas neste estudo as seguintes medidas de desempenho:

Medidas relacionadas com o espaço fabril (shop floor)

- Tempo no espaço fabril (TT) – Tempo médio entre entrada da ordem de produção e a sua conclusão- corresponde ao tempo de reposição do buffer;
- Tempo total no sistema (TTT) – Tempo médio entre a entrada da ordem de produção e a sua entrega ao cliente;
- Quantidade de produto em curso (WIP) – Número médio de produtos a serem produzidos;
- Stock de produtos acabados (FGI) – Número médio de produtos acabados em stock;
- Tempo no stock de produtos acabados (TFGI) – Tempo que o produto acabado passa em stock;

Medidas relacionadas com a encomenda/ cliente:

- Nível Serviço (SL) – percentagem de trabalhos que são entregues dentro da data de entrega;
- Tempo para entrega (DT) – Tempo médio entre a chegada da encomenda do cliente e a sua entrega;
- Tempo de espera do cliente (CWT) – Tempo que um cliente tem de esperar quando o produto final não está em stock na data de entrega para satisfação da encomenda;

No que respeita ao modelo MRP as medidas de desempenho TT e TTT não foram consideradas, uma vez que seriam influenciadas pelo tempo de permanência dos produtos no stock de segurança. Em alternativa usamos o WIP.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos no estudo de simulação do DDMRP e do MRP, com base no plano experimental e nas medidas de desempenho definidas no capítulo 3. A secção 4.1 apresenta o impacto dos parâmetros ROP, ROQ e folga da DD no desempenho do sistema DDMRP, enquanto a secção 4.2 apresenta o impacto dos parâmetros SS e folga da DD no desempenho.

4.1. DDMRP: impacto dos parâmetros

A tabela 3 apresenta os resultados para o sistema DDMRP quando a regra de despacho para a priorização das ordens de produção no espaço fabril é FCFS. Foram consideradas três níveis para o ROP, de 3, 4 e 5, dois níveis para o ROQ, de 1 e 4 e dois níveis para a folga na data de entrega, de 30 e 40, como indicado no capítulo anterior.

Fator experimental				Medidas de desempenho							
Cenário	ROP	ROQ	Folga DD	TT	TTT	DT	FGI	SL	CWT	TFGI	WIP
1	3	1	30	38,1	67,0	31,5	26,0	88,8	11,3	28,9	29,5
2	3	1	40	38,1	76,2	40,7	34,3	94,7	9,2	38,1	29,5
3	4	1	30	38,1	75,2	30,9	33,5	93,3	10,3	37,1	29,5
4	4	1	40	38,1	84,7	40,4	42,0	97,0	8,2	46,6	29,5
5	5	1	30	38,1	83,7	30,5	41,1	96,1	9,2	45,6	29,5
6	5	1	40	38,1	93,5	40,2	49,9	98,3	7,2	55,3	29,5
7	3	4	30	39,9	79,7	30,8	35,8	93,3	10,2	39,8	33,7
8	3	4	40	39,9	89,3	40,3	44,4	96,9	8,4	49,3	33,7
9	4	4	30	39,9	88,3	30,4	43,5	96,1	9,3	48,4	33,7
10	4	4	40	39,9	98,0	40,2	52,2	98,3	7,5	58,1	33,7
11	5	4	30	39,9	97,0	30,2	51,3	97,7	8,4	57,0	33,7
12	5	4	40	39,9	106,8	40,1	60,1	99,0	6,5	66,9	33,7

Tabela 3 - Resultados da Simulação DDMRP para a regra FCFS

Com base nos resultados indicado na tabela pode-se concluir o seguinte:

Impacto da folga da data de entrega:

- A folga DD não tem impacto no TT e, portanto, no nível de WIP;
- A folga DD tem impacto direto no tempo de espera do cliente (CWT – customer waiting time);
- Sendo o TFGI menor porque a folga DD é menor, leva a um aumento da probabilidade de rutura de stock e, portanto, a um menor nível de serviço, SL;

Impacto do ponto de encomenda, ROP:

- Um ROP maior, conduz a um valor FGI maior, ou seja, conduz a mais stock de produto acabado.
- Se FGI aumenta, significa que os produtos passam em stock, TFGI, e que o tempo de espera do cliente pela sua encomenda CWT tende a ser menor.

Impacto da quantidade encomendada, ROQ:

- Se o ROQ aumenta, o TT aumenta devido a um nível de WIP mais alto no espaço fabril, ou seja, tende a criar sobrecargas;
- O ROQ não tem impacto no DT, o qual tende a seguir a DD;
- Um ROQ maior, conduz a um valor FGI maior, isto porque estamos a mandar produzir e a colocar mais trabalhos em stock;
- Um FGI mais elevado, leva a uma percentagem menor de pedidos atrasados, pois há menos probabilidade de rutura de stock para o produto pedido;

4.2. DDMRP: impacto da regra de despacho

As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados para o sistema DDMRP quando a regra de despacho para a priorização das ordens de produção no espaço fabril são a EAD e a LNFP. Foram consideradas três níveis para o ROP, de 3, 4 e 5, dois níveis para o ROQ, de 1 e 4 e dois níveis para a folga na data de entrega, de 30 e 40, como indicado no capítulo anterior.

Fator experimental				Medidas de desempenho							
Cenário	ROP	ROQ	Folga DD	TT	TTT	DT	FGI	SL	CWT	TFGI	WIP
1	3	1	30	38,2	67	31,5	26	88,9	11,3	28,8	29,9
2	3	1	40	38,2	76,2	40,7	34,2	94,7	9,3	38	29,9
3	4	1	30	38,2	75,2	30,9	33,4	93,3	10,3	37,1	29,9
4	4	1	40	38,2	84,7	40,4	42,0	97	8,2	46,6	29,9
5	5	1	30	38,2	83,7	30,5	41	96,1	9,2	45,6	29,9
6	5	1	40	38,2	93,4	40,2	49,8	98,3	7,2	55,3	29,9
7	3	4	30	40,1	79,7	30,8	35,6	93,3	10,4	39,6	33,0
8	3	4	40	40,1	89,2	40,3	44,2	96,9	8,6	49,1	33,0
9	4	4	30	40,1	88,3	30,5	43,3	96	9,5	48,1	33,0
10	4	4	40	40,1	98	40,2	52	98,3	7,8	57,9	33,0
11	5	4	30	40,1	96,9	30,3	51,1	97,7	8,6	56,8	33,0
12	5	4	40	40,1	106,8	40,1	60	99	6,8	66,7	33,0

Tabela 4 - Resultados da Simulação do DDMRP para a regra EAD

Fator experimental				Medidas de desempenho							
Cenário	ROP	ROQ	Folga DD	TT	TTT	DT	FGI	SL	CWT	TFGI	WIP
1	3	1	30	38,1	67	31,5	26	88,8	11,3	28,9	29,5
2	3	1	40	38,1	76,2	40,7	34,3	94,7	9,2	38,1	29,5
3	4	1	30	38,1	75,2	30,9	33,5	93,3	10,3	37,1	29,5
4	4	1	40	38,1	84,7	40,4	42,0	97	8,2	46,6	29,5
5	5	1	30	38,1	83,7	30,5	41,1	96,1	9,2	45,6	29,5
6	5	1	40	38,1	93,5	40,2	49,9	98,3	7,2	55,3	29,5
7	3	4	30	39,6	79,4	30,4	35,8	96,4	9,7	39,8	30,4
8	3	4	40	39,6	89,1	40,2	44,5	98,4	9,0	49,6	30,4
9	4	4	30	39,6	88,1	30,2	43,6	98,2	8,3	48,5	30,4
10	4	4	40	39,6	97,9	40,1	52,5	99,2	7,5	58,4	30,4
11	5	4	30	39,6	96,9	30,1	51,5	99,1	6,9	57,3	30,4
12	5	4	40	39,6	106,8	40	60,4	99,6	5,6	67,2	30,4

Tabela 5 - Resultados da Simulação do DDMRP para a regra LNFP

Com base nos resultados das tabelas acima pode-se concluir o seguinte:

- O impacto dos três parâmetros considerados na seção anterior, ROP, ROQ e folga da data de entrega é independente da regra de despacho, ou seja, conclusões idênticas às apresentadas na seção anterior são obtidas.

Impacto da regra de despacho:

- A regra de despacho EAD tem um impacto insignificante quando comparada com a FCFS;
- Se a regra de despacho for a LNFP e se o ROQ for um, esta regra de despacho tem um impacto novamente insignificante quando comparado com a FCFS e EAD. No entanto para a situação em que o ROQ é igual quatro, esta regra supera as outras duas. Este efeito deve-se ao fato de existirem diferentes valores de prioridade para trabalhos do mesmo tipo, dependendo da posição do stock na geração do pedido.

4.3. MRP: impacto dos parâmetros

A tabela 6 estão apresentados os resultados para o sistema MRP quando a regra de despacho para a priorização das ordens de produção no espaço fabril é a data de autorização mais cedo (EAD). Foram consideradas 6 níveis para o stock de segurança e dois níveis para a folga na data de entrega, de 30 e 40, como indicado no capítulo anterior.

Fator experimental								Medidas de desempenho					
Cenário	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	Folga DD	DT	SL	TFGI	CWT	FGI	WIP
1	24	0	0	0	0	0	30	32,5	79,5	17,2	11,3	39,5	32,7
2	24	0	0	0	0	0	40	41,6	84,7	19,0	9,9	41,1	39,0
3	24	12	3	3	3	3	30	30,5	94,0	24,2	6,9	45,8	48,6
4	24	12	3	3	3	3	40	40,4	94,9	25,0	6,7	46,6	57,7
5	32	0	0	0	0	0	30	31,4	87,8	25,1	10,5	54,5	32,7
6	32	0	0	0	0	0	40	40,9	91,5	27,1	9,2	56,4	39,0
7	32	16	4	4	4	4	30	30,1	98,2	34,2	5,4	62,8	56,9
8	32	16	4	4	4	4	40	40,1	98,3	34,7	5,2	63,2	66,3
9	40	0	0	0	0	0	30	30,8	92,9	33,3	9,7	70,0	32,7
10	40	0	0	0	0	0	40	40,5	95,3	35,6	8,5	72,0	39,0
11	40	20	5	5	5	5	30	30,1	99,2	43,7	5,1	79,3	65,3
12	40	20	5	5	5	5	40	40,0	99,3	44,0	4,5	79,6	72,1

Tabela 6 - Resultados Simulação do sistema MRP para a regra EAD

Com base nos resultados da tabela pode-se concluir o seguinte:

Impacto da folga da data de entrega:

- A folga DD tem impacto direto no tempo de espera do cliente.
- Um TFGI menor resultante de uma folga da DD menor, leva a um aumento da probabilidade de rutura de stock e consequentemente a um menor nível de serviço, SL;

Impacto do stock de segurança SS:

- Se o SS de produto acabado é maior, o FGI aumenta e, portanto, o nível de serviço ao cliente tende a ser maior; por outro lado pedidos atrasados esperam menos, ou seja, o tempo de espera do cliente é menor;
- Se o SS de componentes é maior, o WIP também é maior e consequentemente o FGI também é maior.
- O SS não impacta o DT, que por sua vez tem comportamento idêntico à data de entrega DD;

4.4. DDMRP vs. MRP

Para a análise e comparação do desempenho dos dois sistemas de controlo da produção são a seguir apresentadas as figuras 9 e 10. O primeiro relaciona o WIP com o nível de serviço e segundo relaciona o FGI com o nível de serviço. A regra de despacho considerada nos dois sistemas de controlo da produção é a data de autorização mais cedo, EAD.

A seleção do WIP e do FGI como medidas de desempenho base para a comparação dos dois sistemas, está relacionada com o facto de serem medidas que as empresas tipicamente relacionam com custos, neste caso custo de posse de stock em termos de trabalho em curso de fabrico e de produto acabado.

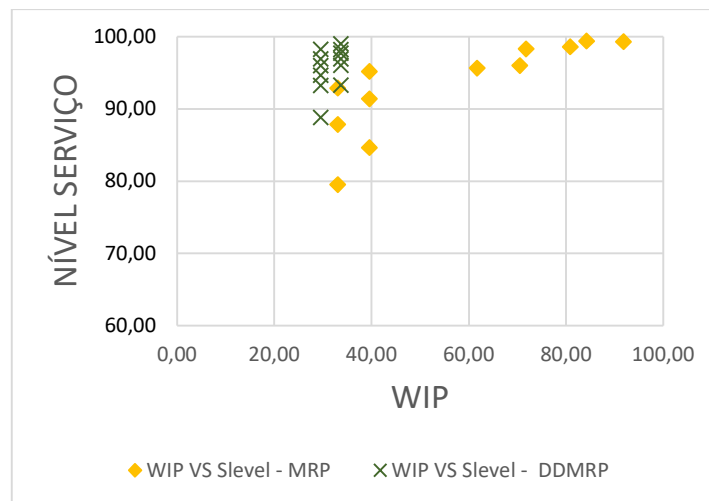


Figura 9 - WIP vs. Nível de Serviço

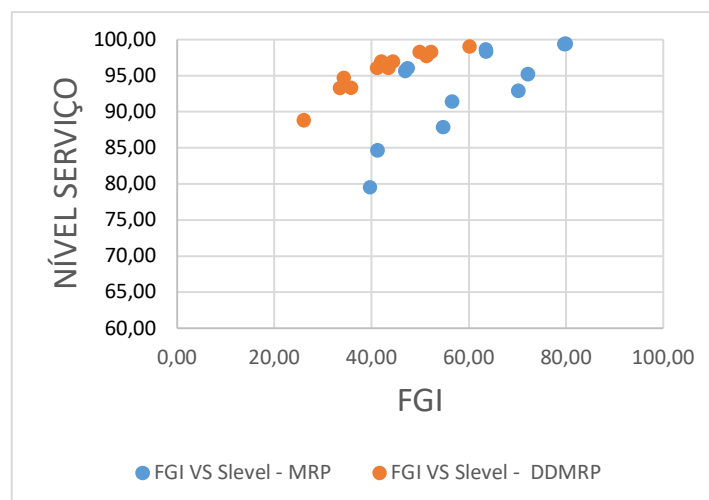


Figura 10 - FGI vs. Nível de Serviço

Com base nos resultados pode-se concluir o seguinte:

- Impacto do WIP: o DDMRP permite obter um determinado nível de serviço com menor trabalho em curso de fabrico e, ou seja, com menos investimento.
- Impacto do FGI: o DDMRP permite obter um determinado nível de serviço com menor stock de produto acabado, ou seja, com menos investimento.

Podemos, portanto, concluir que o DDMRP apresenta um desempenho superior ao do MRP, sendo mais adequado no sistema produtivo em estudo.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

5.1. Conclusões

O trabalho apresentado nesta dissertação permite tirar conclusões importantes sobre o desempenho dos sistemas MRP e do DDMRP no ambiente produtivo em estudo.

Uma das questões de investigação colocadas no início deste trabalho prendeu-se com procurar perceber qual o desempenho relativo destes dois sistemas? Em resposta a esta questão é a de que o sistema DDMRP apresenta um melhor desempenho que o MRP resultando em menos WIP e menos FGI para atingir um determinado nível de serviço.

Outra das questões de investigação centrou-se em procurar perceber o impacto dos parâmetros do DDMRP no seu desempenho. Foram identificados como parâmetros principais o ponto de encomenda, ROP, a quantidade a encomendar ROQ, e a regra de despacho a usar para a priorização das ordens de produção no espaço fabril. Em particular procurou-se perceber se o status dos buffers deve ser usado para priorizar as ordens de produção.

Os resultados obtidos indicam que o uso da posição do fluxo líquido (NFP) para priorizar as ordens de produção, desempenha melhor que as regras de despacho centradas na data devida de entrega ou mesmo FCFS. No entanto, se a quantidade a encomendar (i.e., de reabastecimento) for unitária, a priorização de pedidos com base no status dos buffers tem um desempenho idêntico às outras duas regras. Relativamente ao impacto do ROP e do ROQ no sistema DDMRP conclui-se que estes têm um impacto importante nível de serviço ao cliente.

Em resumo podemos concluir que o desempenho do DDMRP com base nos resultados obtidos através da simulação apresenta resultados superiores ao do MRP do ponto de vista do stock que é necessário (e custos associados) para atingir um determinado nível de serviço.

5.2. Propostas de Trabalho Futuro

Como trabalho futuro, sugere-se o alargamento no sistema de produção do estudo de forma a analisar o impacto do posicionamento dos buffers e o impacto de haver diversos buffers que necessitam de ser controlados. Seria também interessante estudar outras regras de prioridade de status de buffer, atendendo os resultados promissores obtidos com a regra de posição de fluxo líquido testada.

Uma das limitações do estudo realizado prende-se com a análise do desempenho do DDMRP numa situação em que os pontos de encomenda de todos os produtos considerados é igual. Pelo que poderá ser particularmente interessante estudar o impacto de uma regra de prioridade orientada

pela quantidade disponível em stock dividida pelo stock segurança embutido no buffer, conforme sugerido na literatura DDMRP, em situações de diferentes pontos de encomenda para cada um dos produtos. Por fim, sugere-se averiguar o impacto das conclusões retiradas neste trabalho em ambientes produtivos reais e complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abuhilal, L., Rabadi, G., & Sousa-Poza, A. (2006). Supply Chain Inventory Control: A Comparison Among JIT, MRP, and MRP With Information Sharing Using Simulation. *Engineering Management Journal*, 18(2), 51–57. <https://doi.org/10.1080/10429247.2006.11431694>
- Azzamouri, A., Baptiste, P., Dessevre, G., & Pellerin, R. (2021). Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP): A systematic review and classification. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(3), 439–456. <https://doi.org/10.3926/jiem.3331>
- Dessevre, G., Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Pellerin, R., & Lauras, M. (2019). Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: a feedback loop approach. *Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019*. <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948198>
- Erraoui, Y., Charkaoui, A., & Echchatbi, A. (2019). Demand driven DRP: Assessment of a new approach to distribution. *International Journal of Supply and Operations Management*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.22034/2019.1.1>
- Goldratt, E. M. (1984). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement, Third Revised Edition*. Great Barrington, MA : North River Press, c2004. www.northriverpress.com
- Jodlbauer, H., & Huber, A. (2008). Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. *International Journal of Production Research*, 46(8), 2179–2195. <https://doi.org/10.1080/00207540600609297>
- 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. <https://doi.org/10.3926/jiem.2654>
- Liker, J., & Meier, D. (2006). *Toyota way fieldbook* (978.ª–007144 ed.). McGraw Hill.
- Louly, M., Dolgui, A., Manufacturing, A. A.-A.-J. of I., & 2012, undefined. (2012). Optimal MRP offsetting for assembly systems with stochastic lead times: POQ policy and service level constraint. *Springer*, 23, 2485–2495. <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0515-7>
- Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., & Milian, B. (2016). An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1725–1730. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.07.831>
- Orue, A., Lizarralde, A., & Kortabarria, A. (2020). Demand Driven MRP – The need to standardise an implementation process. *International Journal of Production Management and Engineering*, 8(2), 65. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.12737>
- Pekarcíková, M., Trebuňa, P., Kliment, M., Edl, M., & Rosocha, L. (2020). TRANSFORMATION THE LOGISTICS TO DIGITAL LOGISTICS: THEORETICAL APPROACH. *Acta logistica*, 7(4), 217–223. <https://doi.org/10.22306/al.v7i4.174>
- Pekarcíková, M., Trebuna, P., Kliment, M., & Trojan, J. (2019). Demand driven material requirements planning. Some methodical and practical comments. *Management and Production Engineering Review*, Vol. 10, N(2), 50–59. <https://doi.org/10.24425/MPER.2019.129568>
- Ptack, C. A., & Smith, C. (2011). *Orlicky's Material Requirements Planning*. McGraw-Hill Education.

- <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071755634>
- Ptak, C. A., & Smith, C. (2016). *Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP)*. Industrial Press.
- Ptak, C., & Smith, C. (2011). *Orlicky's material requirements planning*. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071755634>
- Schmidt, M., Hartmann, W., & Nyhuis, P. (2012). Simulation based comparison of safety-stock calculation methods. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), 403–406. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.054>
- Shingo, S., & Bodek, N. (2019). A Study of the Toyota Production System From an Industrial Engineering Viewpoint. Em A. P. Dillon (Ed.), *A Study of the Toyota Production System: From an Industrial Engineering Viewpoint*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315136509>
- Shofa, M. J., Moeis, A. O., & Restiana, N. (2018). Effective production planning for purchased part under long lead time and uncertain demand: MRP Vs demand-driven MRP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012055>
- Simons, J. V., & Simpson, W. P. (2009). AN EXPOSITION OF MULTIPLE CONSTRAINT SCHEDULING AS IMPLEMENTED IN THE GOAL SYSTEM (FORMERLY DISASTERTM). Em *Production and Operations Management* (Vol. 6, Número 1). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.1997.tb00409.x>
- Steele, D. C., Philipoom, P. R., Malhotra, M. K., & Fry, T. D. (2007). *Comparisons between drum-buffer-ropo and material requirements planning: a case study*. 43(15), 3181–3208. <https://doi.org/10.1080/00207540500076704>
- Thürer, M., Fernandes, N. O., Carmo-Silva, S., & Stevenson, M. (2018). Lot splitting under load-limiting order release in high-variety shops: An assessment by simulation. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.06.003>
- 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. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849847>
- Velasco Acosta, A. P., Mascle, C., & Baptiste, P. (2020a). Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 58(14), 4233–4245. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650978>
- Velasco Acosta, A. P., Mascle, C., & Baptiste, P. (2020b). Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 58(14), 4233–4245. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650978>

APÊNDICE A – CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

Tabela A.1 – Análise de sensibilidade das Condições de Simulação

Tempo de simulação	Warm Up	Número Replicações	ROP	ROQ	FOLGA DD	TTT
13000	3000	10	3	1	30	66,92±0,36
13000	3000	30	3	1	30	66,81±0,24
13000	3000	50	3	1	30	66,81±0,17
13000	3000	100	3	1	30	66,83±0,11
15000	5000	10	3	1	30	66,86±0,38
15000	5000	30	3	1	30	66,84±0,22
15000	5000	50	3	1	30	66,85±0,16
15000	5000	100	3	1	30	66,99±0,12
20000	10000	10	3	1	30	66,88±0,34
20000	10000	30	3	1	30	66,78±0,15
20000	10000	50	3	1	30	66,80±0,13
20000	10000	100	3	1	30	66,93±0,11
30000	20000	10	3	1	30	67,08±0,44
30000	20000	30	3	1	30	66,94±0,18
30000	20000	50	3	1	30	66,99±0,17
30000	20000	100	3	1	30	67,00±0,13
50000	30000	10	3	1	30	66,66±0,14
50000	30000	30	3	1	30	66,77±0,12
50000	30000	50	3	1	30	66,85±0,13
50000	30000	100	3	1	30	66,99±0,09

APÊNDICE B – PONTO DE ENCOMENDA

Tabela B.1- Cálculo do ROP

Procura								
Produto	1	2	3	4	5	6	7	8
Média	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Variância	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
TT obtido na simulação (IMR; ROQ=1)								
mean	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8	38,8
StDev (S)	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
Var	246,5	246,5	246,5	246,5	246,5	246,5	246,5	246,5

ROP = ADU*DLT+SS								
SF								
-0,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
0	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
0,5	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4

ROP (valores arredondados)								
SF	1	2	3	4	5	6	7	8
-0,5	3	3	3	3	3	3	3	3
0	4	4	4	4	4	4	4	4
0,5	5	5	5	5	5	5	5	5