

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Luis Miguel Martins

**Controlo da atividade de produção em ambientes dinâmicos com recurso
a sistemas autónomos**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho efetuado sob a orientação dos

Professora Doutora Maria Leonilde Rocha Varela

Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Outubro de 2018

DECLARAÇÃO

Nome: Luis Miguel Martins

Endereço eletrónico: luis_miguel-17@hotmail.com

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14998604

Título da dissertação: Controlo da atividade de produção em ambientes dinâmicos com recurso a sistemas autónomos

Orientadores:

Professora Doutora Maria Leonilde Rocha Varela

Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Ano de conclusão: 2018

Mestrado em Engenharia de Sistemas

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

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Dedico este espaço a todos aqueles que tornaram possível, de forma direta ou indiretamente a realização desta dissertação. E desde já manifesto o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar ao Doutor Nuno Octávio Fernandes pelo apoio e orientação na realização desta dissertação. Foi incansável, mostrando sempre disponibilidade e dinamismo em ajudar-me a resolver os problemas que foram surgindo ao longo deste percurso, sem a qual a realização desta dissertação seria mais árdua. Agradeço imenso a sua colaboração!

De seguida quero agradecer a Doutora Maria Leonilde Rocha Varela, que me foi dando motivação para e esperança para a conclusão deste trabalho atempadamente. O seu otimismo e tranquilidade de discurso permitiu observar por outros ângulos a escrita da dissertação.

Agradeço também ao Doutor Sílvio do Carmo Silva que contribuiu positivamente com a sua sabedoria e expertise sobre o tema estudado.

Aos meus pais pelo apoio contínuo que me deram e pelos valores que me forma transmitindo, de nunca desistir.

Dedico este paragrafo a minha irmã Marina Martins que me ajudou nos momentos finais deste trabalho. Dando-lhe o meu mais sincero obrigado!

Ao Diogo Miguel Góis pela sua grande amizade e orientação dada nos momentos onde era necessário tomar decisões complexas.

Agradeço a todos os amigos que fiz ao longo do meu percurso académico por todos os momentos inesquecíveis que partilhamos tendo sido de extrema importância nesta etapa da minha vida.

RESUMO

As empresas industriais enfrentam ambientes de produção cada vez mais difíceis e complexos. Fatores externos à empresa, como variações ao nível dos produtos e das quantidades solicitadas, bem como fatores internos, decorrentes de avarias, setups e tempos de processamento variáveis, entre outros, representam grandes desafios para o Controlo da Atividade de Produção (PAC – *Production Activity Control*). Lidar com estes aspetos de dinâmica e complexidade ao nível do PAC é crucial para a eficiência dos sistemas de produção. No entanto, os métodos correntemente utilizados baseados em abordagens centralizadas de planeamento nem sempre são adequados para lidar com ambientes de produção complexos e dinâmicos. O controlo autónomo da produção (APC - *Autonomous Production Control*) representa uma alternativa que visa melhorar o desempenho dos sistemas de produção pela reação rápida e flexível às mudanças ou alterações que possam ocorrer nos sistemas de produção. Para tal o APC transfere o poder de decisão para objetos logísticos (e.g., máquinas, transportadores, trabalho, etc.) “inteligentes” e distribuídos.

No âmbito deste trabalho são estudados dois métodos para o controlo autónomo da produção, QLE (*Queue Length Estimator*) e PHE (*Pheromones*), em diferentes ambientes produtivos. É também proposta uma nova regra de despacho, baseada numa regra existente, para a sequenciação dos trabalhos em fila de espera das máquinas.

Os métodos para o controlo autónomo da produção foram testados usando a simulação discreta, com vista a melhor perceber o seu comportamento, procurando encontrar formas de melhorar o seu desempenho. Os resultados obtidos mostram um desempenho superior do método QLE, nos diferentes ambientes produtivos considerados. Os resultados mostram ainda que é possível melhorar o desempenho deste método pela inclusão de informação relativa a avarias e a tempos restantes de processamento (no momento da decisão) no processo de tomada de decisão. Os resultados obtidos mostram ainda que a regra de despacho proposta tem um desempenho superior ao das restantes, com as quais foi comparada. O estudo realizado tem importantes implicações para a prática industrial e para a investigação nesta área.

Palavras-Chave: Controlo da Atividade de Produção (PAC); Controlo Autónomo da Produção (APC); Simulação.

ABSTRACT

Industrial companies face even more difficult and complex production environments. Factors external to the company, such as variations in the products and quantities requested, as well as internal factors, due to failures, setups and variable processing times, among others, represent major challenges for the Production Activity Control (PAC). To deal with these dynamic and complex aspects it is crucial the use of PAC to have a good efficiency in production systems. However, the methods currently used are based on centralized planning approaches and are not always adequate to deal with complex and dynamic production environments. Autonomous Production Control (APC) is an alternative that aims to improve the performance of production systems by rapid and flexible reaction to changes that may occur in production systems. To this end, the APC transfers the power of decision to logistic objects (e.g., machines, conveyors, orders, etc.) "intelligent" and distributed.

In this work two methods for the independent control of production, QLE (Queue Length Estimator) and PHE (Pheromones), are studied in different productive environments. A new dispatch rule, based on an existing rule, is also proposed for the sequential queuing jobs of the machines.

The methods for autonomous production control were tested using discrete simulation to better understand their behavior, looking for ways to improve their performance. The results show a superior performance of the QLE method, in the different productive environments considered. The results also show that it is possible to improve the performance of this method by including information regarding failures and remaining processing times (at the time of decision) in the decision-making process. The results also show that the proposed dispatch rule performs better than the others, with which it was compared. The study has important implications for industrial practice and for research in this area.

KEYWORDS: Production activity control (PAC), Autonomous Production Control (APC), Simulation

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos e Metodologia de Investigação.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	2
2. Revisão da Literatura.....	3
2.1. Metodologia.....	4
2.2. Principais Autores na área do APC.....	6
2.3. Tipo de Contribuição.....	7
2.4. Principais Métodos APC.....	8
2.4.1. Características e Desempenho.....	8
2.4.2. Classificação dos Métodos.....	22
2.5. Discussão da Literatura.....	23
3. Estudo de Simulação.....	25
3.1. Modelo de Simulação.....	25
3.2. Controlo do Fluxo de Materiais.....	28
3.3. Plano Experimental e Medidas de Desempenho.....	32
4. Resultados e Análise.....	35
4.1. Resultados para a FFS.....	35
4.1.1. Impacto da Regra de Despacho.....	36
4.1.2. Impacto da <i>Performance Efficiency</i>	37
4.1.3. Impacto do grau de <i>Interchangeability</i>	40

4.1.4.	Melhor cenário para cada método.....	43
4.2.	Resultados para a GFFS	44
4.2.1.	Impacto da Regra de Despacho	45
4.2.2.	Impacto da <i>Performance Efficiency</i>	47
4.2.3.	Impacto do grau <i>Interchangeability</i>	48
4.2.4.	Melhor cenário para cada método.....	50
5.	Extensão do Plano Experimental.....	53
5.1.	Método QLE refinado.....	53
5.2.	Resultados e Análise	54
6.	Conclusões e Propostas de Trabalho Futuro	57
6.1.	Implicações para a Prática Industrial	57
6.2.	Propostas de Trabalho Futuro.....	58
7.	Bibliografia	59
Anexos	62
ANEXO I	- Amostra dos documentos selecionados para a revisão da literatura	62
ANEXO II	- Geração de Ordens para a configuração GFFS no SIMIO™.....	67
ANEXO III	- Geração de Ordens para a configuração GFFS no SIMIO™.....	70
ANEXO IV	- Implementação do parâmetro de <i>Efficiency</i> no SIMIO™	72
ANEXO V	- Implementação do método PHE no SIMIO™	73
ANEXO VI	- Implementação do método QLE no SIMIO™	75
ANEXO VII	- Resultados para diversos níveis de <i>alfa</i>	76
ANEXO VIII	- Resultados obtidos para todos os cenários na FFS.....	77
ANEXO IX	- Resultados obtidos para todos os cenários na FFS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das Principais áreas dos sistemas APC.....	5
Figura 2 - Publicações anuais relativas ao controlo autónomo na base dados Scopus	6
Figura 3 - Principais autores no controlo autónomo da produção em termos de número de documentos publicados.....	6
Figura 4 - Ilustração de uma interação no modelo DWL.....	12
Figura 5 - Ilustração do funcionamento no método DLRP adaptado por (Wenning, Rekersbrink, Timm-Giel, et al., 2006)	17
Figura 6 - Pseudo algoritmo do método CHE, adaptado de B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, et. al., (2010)	19
Figura 7 - Ambiente produtivo (FFS) modelado no software SIMIO	25
Figura 8 - Ambiente produtivo (GFFS) modelado no software SIMIO	25
Figura 9 - Fluxograma de definição de operações a serem produzidas GFFS	26
Figura 10 - Representação da implementação das fórmulas (3) e (5) no software SIMIO para a máquina A1.....	29
<i>Figura 11 - Fluxograma para definição das variáveis binárias MO</i>	<i>30</i>
Figura 12 - Implementação da fórmula 18 no software SIMIO.....	30
Figura 13 - Implementação no software SIMIO do método QLE.....	30
Figura 14 – Desempenho dos diversos métodos APC para o cenário base numa FFS.....	35
Figura 15 – Impacto da regra de despacho no desempenho dos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na FFS.....	37
Figura 16 – Impacto da Performance Efficiency nos métodos APC: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na FFS.....	38
Figura 17 - Impacto da performance efficiency no desempenho dos métodos em termos utilização das máquinas no cenário base e na FFS	40
Figura 18 – Impacto do grau interchangeability para o cenário base nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na configuração FFS.....	41
Figura 19 – Impacto do grau de interchangeability nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na FFS para uma performance efficiency de 80%.....	43
Figura 20 - Desempenho de cada método para o melhor cenário na FFS.....	44
Figura 21 – Desempenho dos diversos métodos APC para o cenário base na GFFS.....	45

Figura 22 - Impacto da regra de despacho no desempenho dos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na GFFS.....	46
Figura 23 - Impacto da Performance Efficiency nos métodos APC: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS.....	47
Figura 24 - Impacto do nível de efficiency na utilização das máquinas no cenário base na GFFS	48
Figura 25 - Impacto do grau interchangeability para o cenário base nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS.....	49
Figura 26 - Impacto do grau de interchangeability nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS para uma performance efficiency de 80%.....	50
Figura 27 - Desempenho dos melhores cenários para cada método APC na GFFS	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos documentos contidos na amostra	7
Tabela 2 - Algumas regras e correspondentes objetivos que podem ser ponderados	21
Tabela 3 - Classificação dos métodos APC (adaptado de K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010) e estendido)	22
Tabela 4 - Fatores experimentais e níveis testados	33
Tabela 5 – Melhoria absoluta do método QLE refinado relativamente ao tradicional QLE na FFS	54
Tabela 6 - Melhoria absoluta do método QLE refinado relativamente ao tradicional QLE na GFFS	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

APC – *Autonomous Production Control*

BMS – *Biological Manufacturing Systems*

CAP – *Controlo da Atividade Produtiva*

CHE – *Chemotaxis*

DLRP - *Distributed Logistic Routing Protocol*

DWL - *Direct Workload*

FCFS – *First Come First Served*

FFS – *Flexible Flow Shop*

GFFS – *General Flexible Flow Shop*

LSIRP - *Link-state internet routing protocol*

MODD – *Modified Operation Due Date*

ODD – *Operation Due Date*

OLTPR – *One logistics target per rule*

PHE – *Pheromones*

PCP – *Planeamento e Controlo da Produção*

QLE – *Queue Length Estimator*

S/RTT+SPT - *Slack Per Remaining job Throughput Time plus the Shortest Processing Time*

SIMIO – *Simulation of Intelligent Objects*

SPT - *Shortest Processing Time*

SRB1 – *Simple Rule Based 1*

SRB2 – *Simple Rule Based 2*

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação aborda o tema do Controlo da Atividade de Produção (CAP) com recurso a sistemas autónomos no âmbito da *Industry 4.0*. Nas seções seguintes é apresentado o enquadramento para a realização do trabalho, os objetivos do estudo, a metodologia de investigação utilizada e a estrutura global da presente dissertação.

1.1. Enquadramento

A iniciativa *Industry 4.0* promovida pelo Governo Alemão para aumentar a produtividade das indústrias (Ivica Veza & Marko Mladineo, 2013), em associação com empresas, universidades e centros de investigação propõem uma importante mudança de paradigma em relação à forma como as indústrias devem operar. Nessa visão de futuro, conhecida como quarta revolução industrial, ocorre uma descentralização ao nível do controlo dos processos produtivos e uma proliferação de dispositivos inteligentes interconectados, ao longo de toda a cadeia logística de produção. Embora este estudo esteja focado meramente nos processos industriais de manufatura, é de notar que esta revolução industrial está a ser alargada a outras áreas, tais como, a medicina ou os transportes (Schlingensiepen, Nemtanu, Mehmood, et. al., 2016),

A atual mudança de paradigma de produção associada à *Industry 4.0*, é particularmente importante para responder à alteração no padrão de consumo, o qual está cada vez mais orientado para produtos personalizados ou customizados (Khan & Turowski, 2016; Wang, Ma, Yang, et. al., 2017). Esta alteração de padrão de consumo traduz-se para as empresas numa redução dos volumes de produção e no aumento da diversidade de produtos em produção, afetando a forma como estes necessitam de ser produzidos. Ou seja, o paradigma de produção passa do conhecido *mass production* (produção em massa) para o designado *mass customization* (personalização em massa). É neste ambiente produtivo cada vez mais dinâmico e complexo, que a aplicação dos conceitos e tecnologias inerentes à *Industry 4.0*, tais como *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Internet-of-Things* (IoT), *Radio Frequency Identification* (RFID), *Comunication (Human-Machine e Machine-Machine)* e *Integrated information*, se torna indispensável, como alternativa da mão-de-obra intensiva dos países de baixos salários, para responder às necessidades individuais de cada cliente de forma economicamente sustentável (Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018).

A *Industry 4.0* vem assim alterar o foco dos sistemas de Planeamento e Controlo de Produção (PCP). O foco deixa de estar nos sistemas centralizados, considerados inapropriados para lidar com a dinâmica e complexidade crescente dos sistemas produtivos (B. Scholz-Reiter, Gorges, & Jagalski, 2011) e passa

a estar nas abordagens autónomas e em tempo real do controlo da produção - *Autonomous Production Control* (APC).

Neste âmbito torna-se, portanto, importante estudar comportamento dos sistemas APC em diferentes contextos produtivos como vista a estabelecer linhas orientadoras à sua implementação na prática industrial.

1.2. Objetivos e Metodologia de Investigação

Os principais objetivos do trabalho são os seguintes: (1) identificar os parâmetros mais relevantes a considerar nos métodos APC para a tomada de decisão em tempo real em ambiente industrial; (2) recorrendo à simulação discreta, modelar o funcionamento de diferentes métodos APC; (3) estudar o comportamento dos métodos APC em contextos produtivos diversos procurando estabelecer implicações para a prática industrial; (4) identificar formas de melhorar o desempenho dos métodos APC.

A metodologia de investigação usada neste trabalho envolveu: (1) a realização de uma revisão da literatura dos métodos APC, com vista a identificar os principais métodos, as suas características e eventuais estudos comparativos de desempenho; (2) o estudo dos métodos APC com recurso à simulação discreta, procurando encontrar formas de melhorar o seu desempenho. A simulação discreta é aqui usada uma vez que permite a modelação de sistemas complexos e dinâmicos, como os que aqui são considerados, com vista ao seu estudo. Foi utilizado o software de simulação SIMIO™, o qual integra os paradigmas de modelação por objetos e por processos, combinando a facilidade de uso dos objetos com flexibilidade de modelação dos processos (Pegden, 2007).

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos. No capítulo 2 é realizada uma revisão da literatura em sistemas APC, procurando identificar os principais métodos, contribuições e lacunas. No capítulo 3 é apresentado o estudo de simulação realizado, envolvendo as características do modelo de simulação, as medidas de desempenho consideradas e o plano experimental adotado. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela simulação. No capítulo 5 são introduzidas melhorias aos métodos apresentados e os seus respetivos desempenhos. E finalmente no capítulo 6 são apresentados as principais conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O futuro da produção industrial no ocidente e em particular na Europa está dependente da capacidade de as empresas responderem às necessidades e expectativas dos seus clientes a custo efetivo. A procura de produtos personalizados com ciclos de vida reduzidos, prazos de entrega curtos e elevada fiabilidade no cumprimento dos prazos acordados constituem alguns dos principais desafios que a indústria enfrenta nos dias de hoje (Hu, 2013; Niehues, Blum, Teschemacher, et. al., 2017).

A *Industry 4.0* permite responder a estas necessidades através de sistemas de Planeamento e Controlo de Produção (PCP) descentralizados e autónomos. Os sistemas tradicionais de PCP são caracterizados por um planeamento e controlo realizado de forma centralizada, o que os torna menos vantajosos, para lidar com a complexidade e a dinâmica imposta pelo novo paradigma de produção conhecido como *mass customization* (Wang, Ma, Yang et al., 2017). A principal razão deve-se à falta de flexibilidade dos sistemas centralizados para se adaptar a perturbações do ambiente de produção resultantes de alterações na procura, aparecimento de ordens de produção urgentes, avarias de máquinas, etc. (B. Scholz-Reiter, Dashkowskij, Görges, et. al., 2012). O desenvolvimento dos sistemas *ciber-físicos*, impulsionados com os avanços nas tecnologias de comunicação sem fios (*wireless*), sensores e do poder computacional, assim como o crescimento da *Internet-of-Things* (IoT) (Roblek, Meško, & Krapež, 2016), permitiu o aparecimento de uma nova abordagem ao controlo da atividade de produção: o Controlo Autónomo da Produção – *Autonomous Production Control* (APC).

Segundo Böse & Windt, (2007) "*Autonomous Control describes processes of decentralized decision-making in heterarchical structures. It presumes interacting elements in non-deterministic systems, which possess the capability and possibility to render decisions.*", e baseia-se em quatro ideias chave (Böse & Windt, 2007): (1) tomada de decisão descentralizada, onde a autoridade decisória é distribuída pelos elementos do sistema, i.e., por objetos logísticos existentes no sistema de produção, tais como máquinas, transportadores, paletes ou trabalhos; (2) autonomia, ou seja, a capacidade dos elementos do sistema para processarem decisões de forma independente; (3) interação, i.e., a troca de informação entre os diversos elementos do sistema para a tomada de decisão; e (4) comportamento não determinístico, significando que, apesar da medição precisa do status do sistema e do conhecimento de todas as variáveis que o influenciam, nenhuma previsão sobre o status do sistema pode ser feita.

Assim, o APC visa melhorar o desempenho dos sistemas de produção através da resposta rápida e flexível às diversas perturbações que possam ocorrer nos sistemas de produção (B. Scholz-Reiter, Rekersbrink, & Görges, 2010). O APC permite ainda uma visão holística da produção pela partilha de

informação em tempo real entre os diversos elementos do sistema, com vista a tomar as melhores decisões para o controlo da produção.

As próximas seções apresentam a metodologia usada na revisão da literatura, as questões de investigação abordadas, os resultados obtidos e a discussão destes.

2.1. Metodologia

A metodologia usada na revisão da literatura segue as seis principais etapas da definidas por Durach, Kembro, & Wieland, (2017), nomeadamente: (1) definir as questões de investigação; (2) determinar as principais características requeridas para o estudo (3) obter uma amostra da literatura potencialmente relevante; (4) selecionar a literatura pertinente; (5) sintetizar a literatura; e (6) relatar os resultados.

O processo de recolha de informação foi iniciado com uma sessão de brainstorming para se definir as principais questões de investigação. Assim, atendendo à crescente importância dos métodos APC no âmbito da *Industry 4.0*, considerou-se relevante levantar as seguintes questões: (1) quais os principais especialistas que têm contribuído para a área do APC? (2) Qual o tipo de contribuições que têm sido realizadas? (3) Quais os métodos APC que têm sido propostos?

Estas questões de investigação constituem a base do trabalho e concluem o primeiro passo da revisão da literatura. No passo seguinte procurou-se definir os critérios para a recolha da amostra. Neste âmbito foram definidos critérios que resultassem numa amostra que incluísse aplicação dos métodos APC a processos industriais de produção, envolvendo decisões do controlo da atividade de produção, tais como o lançamento, a alocação dos trabalhos a máquinas ou recursos e a sequenciação ou despacho desses trabalhos nas máquinas. O conteúdo dos documentos resultantes pode conter uma *framework*, uma aplicação, uma técnica, um novo método, etc. no contexto da tomada de decisão em sistemas autónomos de controlo da produção.

A pesquisa para obtenção da amostra, que representa o terceiro passo da metodologia mencionada, foi realizada no início de fevereiro e repetida no início de outubro de 2018, e decorreu em duas fases, usando a base de dados Scopus - a mais extensa base de dados de documentos científicos atualmente existente. Numa primeira fase foi realizada uma pesquisa tendo em conta o título, o resumo e as palavras-chave dos documentos existentes na base de dados, usando a seguinte *script* de pesquisa:

TITLE-ABS-KEY ("Autonomous Control")

Esta pesquisa resultou em 2842 documentos, muitos dos quais fora do âmbito do estudo. Alguns dos resultados obtidos envolveram documentos sobre UAVs (Unmanned aerial vehicles), tecnologias para o controlo autónomo (e.g., sensores, robôs, etc.), sistema de energia, etc. A Figura 1 elaborada com base no software VOSviewer, fornece uma visão geral das principais áreas (Wong, 2018) relacionadas com o

script acima. A distribuição anual dos documentos abrangidos nesta pesquisa (Figura 2) mostra um forte crescimento nos últimos anos do número de publicações que o controlo autónomo tem tido.

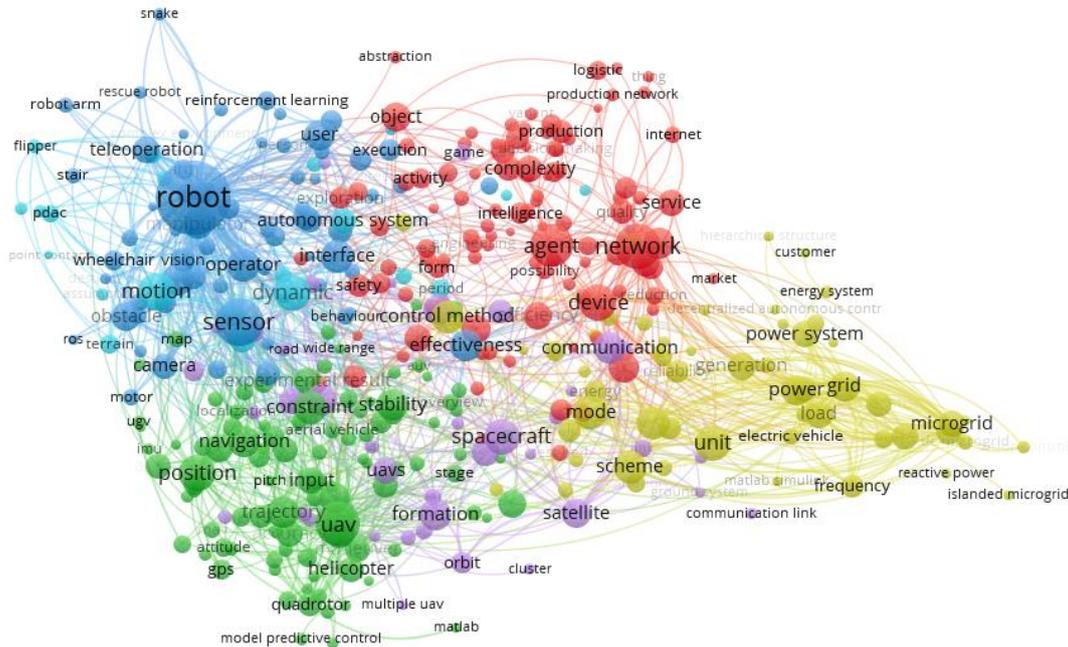


Figura 1 - Distribuição das Principais áreas dos sistemas APC

Assim de forma a restringir os documentos aos relevantes para o estudo, foi realizada uma segunda pesquisa, utilizando o seguinte *script*:

TITLE-ABS-KEY ("Autonomous control") AND

TITLE-ABS-KEY ((shop AND floor) OR manufacturing OR production OR materials) AND

ALL (dispatching OR release OR allocation OR planning)

O número de documento resultantes foi de 96, o qual foi posteriormente reduzido a 51 após a leitura dos resumos desses documentos. Posteriormente, após a análise das referências bibliográficas destes 51 documentos foram identificados mais 21 documentos relevantes, resultando numa amostra composta por um total de 72 documentos. A amostra obtida representa o final da quarta etapa da revisão da literatura e encontra-se no anexo I.

As etapas 5 e 6, sintetizar a literatura e relatar os resultados são abordadas nas próximas secções deste capítulo, com base na amostra de 72 documentos.



Figura 2 - Publicações anuais relativas ao controlo autónomo na base dados Scopus

2.2. Principais Autores na área do APC

Na Figura 3 são identificados os principais autores (top 10) na área do controlo autónomo da produção em termos do número de publicações num universo de 107 autores, responsáveis pelos 72 artigos. Bernd Scholz-Reiter é o autor com maior número documentos, 35 num total 72, ou seja, em 49%. Bernd Scholz-Reiter começou a escrever sobre o controlo autónomo da produção em 1999. Foi diretor e fundador do *Fraunhofer Application Center for Logistics System Planning and Information Systems*, também foi diretor do Bremen *Institute for Production and Logistics* (BIBA).

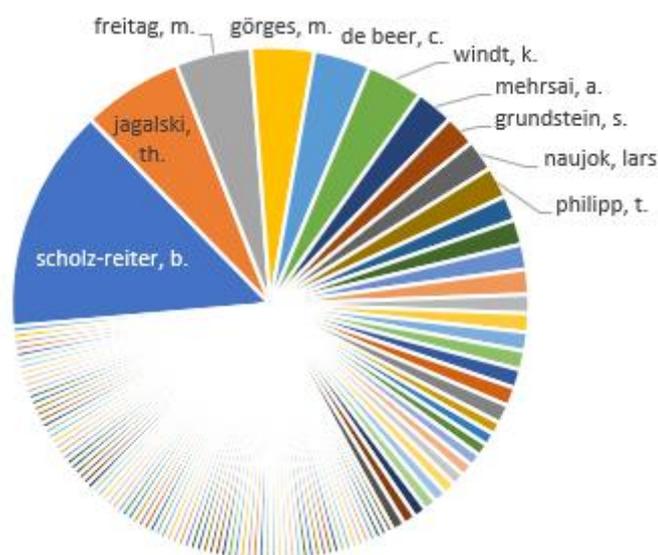


Figura 3 - Principais autores no controlo autónomo da produção em termos de número de documentos publicados.

O número total de autores, 107, indica que uma comunidade científica relativamente pequena estuda esta área. Encontrando-se o controlo autónomo da produção numa fase inicial de desenvolvimento e tendo o tema da *Industry 4.0* despertado grande interesse na comunidade científica, espera-se que num futuro próximo a comunidade de autores e o número de contribuições possa aumentar significativamente.

2.3. Tipo de Contribuição

Para se perceber qual o caminho que a investigação na área do APC está a seguir foi efetuada uma classificação dos documentos encontrados de acordo com o tipo de contribuição (ver Tabela 1): (1) teórica vs. empírica; e (2) proposta de novo método, proposta de *framework*, comparação de métodos, ou outro (inclui a criação de interfaces programadas para métodos APC e de *hardware* e *software* para a implementação dos mesmos).

Tabela 1 - Classificação dos documentos contidos na amostra

Tipo de trabalho	Novo Método	<i>Framework</i>	Comparação de Métodos	Outro
Teórico	16	30	30	4
Empírico	2	0	4	1

Entende-se a investigação de cariz teórica como podendo referir-se a novos *frameworks*, novos métodos, etc. em contextos hipotéticos. O investigador não usa dados empíricos para construir a sua teoria, mas usa exemplos hipotéticos. Este também não analisa trabalhos concretos e específicos. Enquanto que a investigação empírica usa evidências empíricas. A investigação empírica parte de exemplos reais específicos ou observações para criar um modelo e, subsequentemente, uma teoria. Mais se acrescenta que existem diversos documentos que se podem enquadrar a mais de um critério.

Como se pode verificar a maioria das publicações, 92% dos documentos, aborda questões teóricas. O foco maioritário dos trabalhos tem sido em trabalho de cariz teórico, envolvendo o desenvolvimento de *frameworks* e a comparação de métodos. A introdução de *frameworks* representa 34% enquanto a comparação entre métodos representa 39%, se consideramos os trabalhos empíricos e teóricos.

O foco nos trabalhos de cariz teórico parece evidenciar uma preocupação dos investigadores nesta fase inicial com o desenvolvimento de novas abordagens/métodos para controlo autónomo da produção.

2.4. Principais Métodos APC

Diversos métodos APC têm sido desenvolvidos e propostos. Estes atuam essencialmente ao nível da seleção da máquina que irá processar o trabalho entre diferentes alternativas (máquinas paralelas) e na sequenciação dos trabalhos alocados às máquinas. A secção 2.4.1 resume os métodos identificados, nomeadamente no que concerne à forma como estes funcionam e desempenham, enquanto a secção 2.4.2 procede à sua classificação.

2.4.1. Características e Desempenho

Os principais métodos APC encontrados na literatura são os seguintes:

- **Queue Length Estimator (QLE):** Este método foi desenvolvido por J. Bendul (K. Windt, Becker, Jeken, et. al., 2010), sendo usado pelos trabalhos que se encontram no espaço fabril para decidir sobre o seu roteiro de fabrico através de um conjunto de máquinas paralelas. Em cada estágio de produção o trabalho seleciona a máquina que reduz o seu tempo de percurso no estágio, este tempo é definido como sendo o somatório entre o tempo de espera até ser processado e o tempo de processamento de uma peça numa determinada máquina/estágio, comparando os níveis de carga em cada uma das máquinas. O nível estimado de carga na máquina m , QLE_m , é obtido adicionando o tempo de processamento do trabalho j em m , PT_{mj} , ao tempo de processamento dos trabalhos j que se encontram em fila de espera de m , QL_{mk} . como apresentado na fórmula (1).

$$QLE_m = PT_{mj} + \sum_{j \in Q_m} QL_{mj} \quad (1)$$

Onde Q_m se refere ao conjunto de trabalhos em fila de espera da máquina m .

O método tem sido testado em ambiente hipotéticos de *Flexible Flow Shop* (FFS), com base em: (1) diferentes distribuições para o intervalo entre chegadas de encomendas ao sistema (Fernandes, Martins, & Carmo-silva, 2018; B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., 2007); (2) diferentes distribuições para o tempo de processamento (Fernandes, Martins, & Carmo-silva, 2018); e (3) na presença de avarias aleatórias das máquinas ou recursos (K. Windt, Becker, Jeken, et. al., 2010). Têm ainda sido testado sob a influência: (1) do número de estágios produtivos (Philipp, De Beer, Windt, et. al., 2007); e (2) do número de máquinas (paralelas) por estágios (Philipp, Beer, K. Windt

et al., 2007; K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). O método foi também testado num ambiente baseado num cenário real por B. Scholz-Reiter, Gorges, & Philipp, (2009)

De uma forma geral o desempenho do método mostrou ser superior ao dos outros com o qual foi comparado, com a algumas exceções (Fernandes, Martins, & Carmo-silva, 2018; B. Scholz-Reiter, De Beer, Freitag, et. al., 2008).

- ***Due Date (DD)***: Este método também apresentado na dissertação de mestrado de J. Bendul (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010), desenvolve-se em duas etapas de decisão. A primeira refere-se à seleção da máquina na qual o trabalho vai ser processado e a segunda á sequenciação dos trabalhos em fila de espera de cada máquina. A primeira etapa de decisão é idêntica ao QLE, ou seja, o trabalho é alocado diretamente a uma das máquinas disponíveis com base no nível estimado de carga na máquina. Na segunda etapa, os trabalhos em fila de espera de cada máquina são sequenciados pela data devida mais próxima da data atual (B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et al., 2007). Ainda que seja por vezes apresentado como um método alternativo ao QLE, na verdade, não se trata de um novo método, mas meramente da extensão do método QLE com uma regra de despacho orientada à data de entrega.
- ***Pheromone (PHE)***: Este método foi também proposto por J. Bendul (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). É um método de inspiração biológica que procura transpor para o controlo da atividade de produção aspetos da natureza associados ao comportamento das formigas, como forma de comunicação, para descobrir os caminhos mais seguros, rápidos e/ou com mais alimento. Nestes caminhos são depositadas quantidades maiores de feromona, tanto maiores quanto mais o caminho conseguir satisfazer as necessidades do animal. As feromonas depositadas estão sujeitas ao efeito de evaporação ao longo do tempo (B. Scholz-Reiter, Gorges, Jagalski, et. al., 2009).

O modelo de decisão para efeitos de controlo da atividade de produção baseia-se na seleção, com uma maior probabilidade, da máquina com a “concentração de feromonas” mais elevada no momento da decisão (K. Windt, Becker, Asenov, et. al., 2010). As máquinas dão informação aos trabalhos dos seus tempos de percurso, com base em dados históricos, para que estes possam tomar a sua decisão. Assim, a probabilidade de seleção da máquina m num determinante instante t , $P_{m(t)}$, é dada pela fórmula (2). Em que $CcPHE_{m(t)}$ se refere à “concentração de feromona” existente na máquina m no instante t e M que se refere ao número total de máquinas paralelas do estágio em questão.

$$P_{m(t)} = \frac{CcPHE_{m(t)}}{\sum_{m=1}^M CcPHE_{m(t)}} \quad (2)$$

$CcPHE_{m(t)}$ pode ser obtida por duas formas alternativas segundo Renna (2010), por um alisamento exponencial como consta na fórmula (3) ou pela utilização de uma média móvel como consta na fórmula (4). Nestas duas fórmulas $DepPHE_{mj}$ refere-se à quantidade de feromona depositada na máquina m pelo trabalho j que acabou de ser processado, N refere-se à ordem da média móvel, ou seja, ao número de trabalhos que são considerados no cálculo; E refere-se à constante de evaporação e $CcPHE_{m(t-1)}$ refere-se à “concentração de feromonas” na máquina m no período anterior à passagem do último trabalho. Estas fórmulas permitem a modelação do efeito da evaporação de feromonas com a passagem do tempo, ao mesmo tempo que são acrescentadas novas feromonas pela passagem (processamento) de novos trabalhos na máquina, imitando assim o seu comportamento natural (Renna, 2010).

$$CcPHE_{m(t)} = E * DepPHE_{mj} + (1 - E) * CcPHE_{m(t-1)} ; E \in [0,1] \quad (3)$$

$$CcPHE_{m(t)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N DepPHE_{mj} \quad (4)$$

$DepPHE_{mj}$ é obtido pelo inverso do tempo de percurso do trabalho j na máquina m sendo representado pela variável TT_{mj} , como indicado na fórmula (5). Este cálculo é efetuado após o processamento do trabalho j na máquina m .

$$DepPHE_{mj} = \frac{1}{TT_{mj}} \quad (5)$$

O método tem sido testado nos mesmos ambientes produtivos do QLE, nomeadamente na FFS. Comparativamente, o seu desempenho é inferior ao do QLE, tendendo a degradar-se com o aumento da complexidade estrutural (i.e., do número de máquinas e de estágios produtivos) e de perturbações na produção (e.g., avarias de máquinas) (B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et al., 2008). Contudo observou-se que para pequenas variações na chegada de trabalhos e elevada variabilidade nos tempos de processamento o PHE consegue obter resultados melhores do que o método QLE ao nível do tempos de percurso (B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et al., 2008).

O método foi ainda testado por Renna (2010) em ambiente *Job Shop* com diversas células para: (1) um diferente número de operações realizadas no produto, (2) alteração do *mix* de produtos a produzir, (3) o desgaste das máquinas assim como a ocorrência de avarias, o desgaste é representado pelo aumento do tempo de processamento generalizado ao longo do tempo, (4) alteração do intervalo de chegada de trabalhos ao sistema e (5) variação da carga no sistema. O autor utilizou duas formulações para PHE, uma baseada na média móvel (fórmula 4) e outra baseada no alisamento exponencial (fórmula 3), tendo o alisamento exponencial desempenhado melhor.

O método foi também implementado em conjugação com o QLE numa abordagem híbrida (Thomas Jagalski & B. Scholz-Reiter, 2008) assim como exposto a inclusão de tempos de *setups* dependentes da sequência de processamento (T Jagalski, De Beer, & Freitag, 2007). Ambas as abordagens mostraram desempenhar melhor do que o método PHE original.

- ***Direct WorkLoad (DWL)***: Recentemente desenvolvido por Fernandes, Martins & Carmo-silva, (2018), o método baseia-se na ideia de que o balanceamento da carga entre estágios produtivos e entre máquinas paralelas em cada um dos estágios é essencial para fazer um melhor uso dos recursos. Ainda que parecido com o QLE, diferencia-se deste porque a alocação de trabalho a máquinas paralelas é realizada com base em normas ou limites de carga em cada máquina. Isso significa que a máquina só está “disponível” a receber trabalhos até um determinado limite, caso contrário o trabalho é recusado pela máquina e mantido numa fila de espera única à entrada do estágio de produção, conforme ilustrado na figura 4. O método procura assim tirar partido das sinergias inerentes a manter os trabalhos numa única fila de espera. A carga considerada pelo trabalho para efeitos de decisão (i.e., de seleção da máquina onde este irá ser processado) é a carga direta em cada máquina, resultante da soma do tempo esperado de processamento do próprio trabalho na máquina ao tempo esperado de processamento dos trabalhos que se encontram em fila de espera da máquina.

Fernandes, Martins & Carmo-silva, (2018) compara os métodos DWL, QLE e PHE no ambiente produtivo de uma FFS sob a influência de: (1) diferentes distribuições para os tempos de processamento; (2) diferentes distribuições para o intervalo de tempo entre chegadas de trabalhos ao sistema; (3) diferentes níveis de utilização dos recursos; e (4) avarias nas máquinas. Os resultados obtidos mostram que o método tem um grande potencial, desempenhando melhor que o QLE e PHE para níveis mais elevados de utilização do sistema e para situações de elevada variabilidade na chegada de trabalho ao sistema e nos tempos de processamento destes.

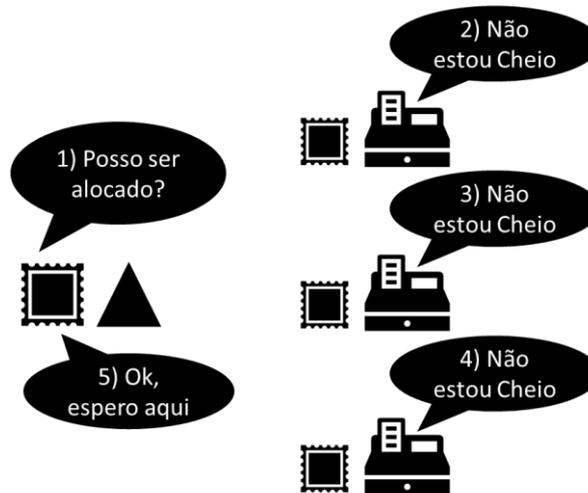


Figura 4 - Ilustração de uma interação no modelo DWL

- **Ant:** Desenvolvido por Cicirello & Smith (2001) segundo K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010), é um método de inspiração biológica que se baseia na imitação do comportamento das formigas na procura de alimento. A tomada de decisão do método ANT é similar ao das PHE diferenciando-se no aspeto que cada tipo de trabalho tem a sua própria “feromonas”. Portanto quando o trabalho decide sobre a máquina a visitar de um conjunto de máquinas alternativas, a decisão é feita com base na “feromona” correspondente a esse tipo de trabalho (Cicirello & Smith, 2001). A fórmula (6) é usada para a seleção da máquina pelo trabalho, com uma dada probabilidade da escolha da máquina m , do tipo de trabalho k num determinado instante de tempo t , $P_{m(t)}^k$, com base nas feromonas existentes nessa máquina m , no mesmo instante de tempo t para o mesmo tipo de trabalho k , $\pi_{m(t)}^k$, onde mp , corresponde ao número de máquinas possíveis de se escolher. Caso a máquina se encontre inativa ou não possua a tecnologia para produzir o tipo de trabalho em causa, a probabilidade de seleção é de 0.

$$P_{m(t)}^k = \begin{cases} \frac{\pi_{m(t)}^k}{\sum_{m=1}^{mp} \pi_{m(t)}^k} & \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

As fórmulas seguintes referem-se a duas formas alternativas de efetuar a evaporação das feromonas. A fórmula (7) aplica uma taxa de evaporação α todos os tipos de feromona k (em que k se refere aos tipos de feromonas). A fórmula (8) aplica uma taxa de evaporação β apenas às feromonas de tipo diferente do tipo do trabalho j , que acabou de ser produzido (Cicirello & Smith, 2001). A atualização da feromona é realizada de cada vez que um trabalho termina o seu processamento na máquina.

$$\pi_{m(t)}^k = \alpha * \pi_{m(t-1)}^k, \alpha \in [0,1] \quad (7)$$

$$\pi_{m(t)}^k = \begin{cases} \beta * \pi_{m(t-1)}^k & \text{se } k \neq j, \beta \in [0,1] \\ \pi_{m(t-1)}^j & \text{se } k = j \end{cases} \quad (8)$$

Em que $\pi_{m(t)}^j$ corresponde à quantidade de feromona do tipo do trabalho j depositado na máquina m e $\pi_{m(t)}^k$ indica a quantidade feromona dos tipos k diferente do tipo do trabalho j na mesma máquina m .

Os testes realizados com este método resumem-se ao ambiente produtivo FFS. O método tem sido testado sob diferentes condições produtivas, nomeadamente: (1) número diferente de máquinas por estagio (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010); (2) presença de avarias nas máquinas ou recursos (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010); (3) número diferente de estágios produtivos; e (4) diferentes tipos de produto a serem produzidos (Cicirello & Smith, 2001a). K. Windt, Becker, Jeken, et al. (2010) compararam o método com o QLE, mostrando ter um fraco desempenho, enquanto Cicirello & Smith (2001) o compararam com métodos heurísticos, tendo um melhor desempenho.

- **Bee foraging (Bee):** Este método foi desenvolvido por B. Scholz-Reiter, Jagalski, & Bendul (2014). É um método que se encaixa na categoria dos métodos de inspiração biológica, procurando imitar, neste caso, o comportamento das abelhas na procura e localização das melhores fontes de alimento (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). Na tomada de decisão este método tem por base a lógica probabilística presente nos métodos ANT e PHE, contudo a informação tida em consideração é diferente, utilizando a “qualidade da fonte de alimento”. Em termos de controlo da produção, a qualidade da fonte de alimento representa a “qualidade” da máquina levando em consideração dois fatores: o valor acrescentado da produção em unidades monetárias, VA^k , de um determinado tipo de trabalho k , e o seu custo sendo este dependente do tempo de percurso na máquina m do mesmo tipo de trabalho k , TT_m^k , de acordo com a fórmula (9). Em que R se refere ao custo de produção por unidade de tempo. O valor MQ_m^k , designado que indica a qualidade da máquina para um determinado tipo de produto k na máquina m , é calculado cada vez que um trabalho acaba de ser concluído numa determina máquina m .

$$MQ_m^k = \frac{VA^k - TT_m^k * R}{TT_m^k * R} \quad (9)$$

O método foi testado por B. Scholz-Reiter, Jagalski, & Bendul (2014) no ambiente de FFS, sob a influência de: (1) tempos de *setups*, (2) avarias nas máquinas e (3) variabilidade no intervalo entre chegadas. Foi comparado a um método convencional, onde os trabalhos têm uma rota fixa selecionando sempre a máquina nativa, i.e., a máquina onde o tempo de processamento é menor, este método, BEE, mostrou desempenhar melhor. Também foi testado sob a influência da chegada de trabalhos urgentes com dados industriais reais, tendo mostrado melhor desempenho do que o método PHE, com o qual foi comparado (B. Scholz-Reiter, Karimi, Duffie, et. al., 2011)

- ***Simple Rule Based 1 (SRB1)***: O SRB1 foi desenhado por B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., (2006), sendo bastante idêntico ao QLE (K. Windt, Becker, Jeken, et. al., 2010). A diferença para o QLE reside na não inclusão do tempo de processamento do próprio trabalho na tomada de decisão. Ou seja, o cálculo do nível de carga em cada máquina é feito adicionando apenas o tempo esperado de processamento dos trabalhos que se encontram em fila de espera da máquina (B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., 2006).

O método foi testado por B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al, (2006), sob a influência: (1) do número de máquinas e estágios produtivos e (2) da variedade de tipos de produtos. O método mostrou ser superior ao método SRB2 que se apresenta abaixo. Os autores Grundstein S., Schukraft S., B. Scholz-Reiter, et. al., (2015) também testaram o SRB1 numa FFS, examinando o efeito: (1) do intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema; e (2) de diferentes proporções de tipos de produtos, ao qual foi comparado com os métodos DD e PHE. Os resultados mostraram um melhor desempenho de SRB1 relativamente a estes dois métodos. Grundstein S., Schukraft S., B. Scholz-Reiter, et. al., (2015) testaram ainda o método quando integrado com o lançamento controlado de trabalhos para a produção. Com esse controle, os autores registaram uma melhoria significativa do método, apenas quando o sistema está sob fortes variações de chegadas de trabalhos e variações na *mix* de trabalhos, já que sob influência de uma procura estável, a integração desse controle piora consideravelmente o desempenho do método SRB1. Contudo continua a ser o melhor do que DD e PHE, excetuando numa situação, quando existe uma chegada de trabalho estável com um lançamento de trabalhos previamente planeado.

- ***Simple Rule Based 2 (SRB 2)***: Desenvolvido por B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., (2006). A tomada de decisão é baseada em dados históricos, ou seja, na seleção da máquina a visitar, o trabalho leva em consideração o somatório do tempo médio de processamento e do tempo médio de espera dos trabalhos que já foram processados, diferenciando os diversos tipos de trabalhos em cada máquina selecionando a máquina com o menor somatório.

K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010) testaram a influência de diversos fatores no desempenho do método, nomeadamente: (1) número de máquinas paralelas em cada estágio de produção e (2) número de estágios de produção, e (3) avarias nas máquinas. Os mesmos parâmetros de teste realizados por B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., (2006) no método SRB1 também foram realizados neste método.

Os resultados indicam que o desempenho do método tende a deteriorar, relativamente ao desempenho dos métodos como o QLE e SRB1, quando o número de estágios e de máquinas paralelas por estágio aumenta, apresentando, contudo, um desempenho semelhante com o método ANT (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). Quanto à influência do número de tipos de produtos, o desempenho do método tem uma ligeira tendência a melhorar quando este aumenta, já que resulta num maior balanceamento de produtos, diminuindo a necessidade do produto mudar de máquina, i.e. seleccionar uma máquina que não é a nativa (B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, et. al., 2006). Os autores justificam o pior desempenho do modelo em ambientes com maior número de máquinas paralelas, pelo facto dos métodos SRB1 e QLE utilizarem dados futuros para a tomada de decisão, permitindo uma reacção mais rápida a alterações e perturbações.

- ***Market based control (Market):*** Método desenvolvido no *Collaborative Research Center (CRC)* na Alemanha, em conjunto com Vollmer (2000), que procura adaptar a lógica de funcionamento dos mercados a um sistema de controlo da produção (K Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). A principal característica deste método é a utilização de uma moeda virtual para a realização de trocas monetárias entre os trabalhos e as máquinas. Procurando imitar a lógica dos mercados, a tomada de decisão é baseada no custo de produção. A cada trabalho lançado em produção é-lhe atribuída uma “lista de compras”, que corresponde às operações de processamento necessárias, tendo cada uma delas um orçamento associado. Na escolha da máquina, o trabalho (ou ordem de produção) avalia os custos de produção em cada máquina, sendo seleccionada a máquina onde o custo é menor. Na eventualidade de existirem diversos trabalhos a concorrer para a mesma máquina, a máquina terá a possibilidade de escolher o trabalho que faça a maior oferta, de acordo com o orçamento inicialmente atribuído ao trabalho para a realização da operação (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010).

Não foi encontrado na amostra da literatura seleccionada qualquer estudo sobre o desempenho deste método. Essa ausência de estudos pode ser explicada pela dificuldade em definir os custos de produção e orçamentos para os trabalhos (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010).

- ***Holonic Manufacturing (Holonic):*** De acordo com Van Brussel, Wyns, Valckenaers, et. al., (1998), o método *Holonic* foi criado por Márkus, Kis Váncza, & Monostori (1996) com o objetivo de reproduzir os efeitos da interação social para o controlo da atividade produtiva. A aceitação de um trabalho, é realizada por uma unidade central e é baseada no lucro estimado, que advém de trabalhos com as mesmas características que foram previamente produzidos. De acordo com o método, cada trabalho tem 4 parâmetros: (1) a data de chegada ou de entrada no sistema; (2) a data devida de entrega; (3) o preço do contrato - valor em unidades monetárias que a unidade central obtém por parte do cliente, pela conclusão do trabalho pedido; e (4) a penalização por entrega atrasada, que consiste numa função de custo que aumenta numa proporção direta do atraso do trabalho. Caso o trabalho seja entregue atrasado, ao preço do contrato irá ser decrementado o valor da penalização. São ainda indicados para cada operação do trabalho a quantidade a ser produzida, o custo máximo da operação e a janela temporal para o qual trabalho terá de ser produzido. Por outro lado, cada máquina tem 2 parâmetros por cada operação que realize, (1) taxa de produção e o (2) custo de produção por unidade de tempo.

Após a unidade central anunciar o trabalho, este recolherá as ofertas realizadas pelos recursos/máquinas e entre estas escolherá a máquina com melhor oferta, contudo as ofertas realizadas pelas máquinas terão que ser bem ponderadas, já que incide uma penalização pela sua conclusão do trabalho em atraso. Contudo, se o controlador não receber nenhuma oferta de produção, este aciona o mecanismo de penalização, que consiste na aplicação de penalizações aos recursos, de acordo com o parâmetro dos trabalhos, que são tecnologicamente capazes de realizar a tarefa, obrigando assim os recursos a realizar ofertas, já que o objetivo das máquinas é maximizar o seu lucro. Neste modelo existem dois parâmetros de decisão: (1) custos/lucros de produção para aceitar o trabalho a ser produzido, que representa um objetivo geral, (2) penalizações/lucros das máquinas, que representa um objetivo local, já que só diz respeito aos recursos (Márkus, Váncza, Monostori, et. al., 1996).

K. Windt, Becker, Jeken, et al. (2010) testaram o método numa FFS estudando a influência: (1) da complexidade do sistema ao nível de número de máquinas por estágio e (2) do número estágios de produção e (3) de avarias nas máquinas. Os resultados obtidos mostram um desempenho semelhante ao dos métodos LSIRP, DLRP, que a seguir se apresentam e ao do QLE, sendo, contudo, superior ao dos métodos ANT e SRB2. Márkus, Váncza, Monostori, et. al., (1996) referem que as definições dos parâmetros dos métodos de atribuição de preços/custos podem alterar o seu

desempenho, e advertem para um potencial conflito entre os objetivos individuais dos recursos e objetivo geral do sistema.

- Link-state internet routing protocol (LSIRP):** O método também foi desenvolvido no *Collaborative Research Center (CRC)* (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010) e utiliza os princípios do algoritmo de Dijkstra para o problema do caminho mais curto e dos protocolos de ligação de Internet. Os protocolos de conexão baseiam-se num conjunto de nós interligados, em que cada um armazena os dados (e.g. distâncias, atrasos) de acordo com as ligações possíveis. De forma a implementar este método, é necessário construir uma rede com nós, que representa a zona de produção, com as máquinas (nós da rede), os vetores ou arco da rede, os custos de percorrer cada arco que liga uma máquina a outra. Com o objetivo de ter a “rede” de produção atualizada, sempre que ocorra uma alteração no estado da máquina (por exemplo devido a avarias), nos níveis de *buffers* (i.e., quantidade de trabalhos em fila de espera das máquinas), ou no estado dos trabalhos (e.g., em atraso) é necessário incluir à sua reflexão a nível de custos na rede produtiva. Tendo informação atualizada, os trabalhos poderão selecionar o caminho mais “curto” através do algoritmo de Dijkstra. Contudo deve existir a preocupação em introduzir apenas a informação relevante para que o nível de esforço computacional não seja demasiado (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010).
- Distributed Logistic Routing Protocol (DLRP):** Desenvolvido por Wenning, Rekersbrink, Timm-Giel, et al., (2006) tem por base a lógica inerente às redes de comunicações. A figura 5 faz uma ilustração do funcionamento do método.

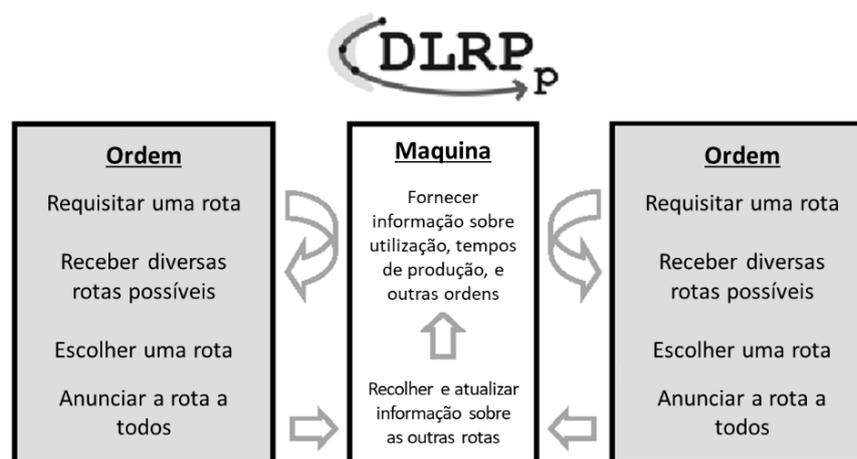


Figura 5 - Ilustração do funcionamento no método DLRP adaptado por (Wenning, Rekersbrink, Timm-Giel, et al., 2006)

Uma rede de comunicação permite a transferência de dados, quando necessário, de uma fonte até ao seu destinatário, procurando minimizar a probabilidade de perdas de informação. Para tal utiliza um canal de comunicação que é escolhido de acordo com determinados critérios (Wenning,

Rekersbrink, Timm-Giel, et al., 2006). Transportando este conceito para uma rede logística de produção, cada ordem de produção emite uma requisição de rota, à qual as máquinas respondem em cascata, ou seja, a construção inicia-se pela primeira operação e vai elaborando as rotas possíveis para aquele trabalho naquele determinado momento, até a última operação que reenviará essa informação para a ordem de produção. Essa construção é baseada numa métrica calculada em cada recurso ou máquina, de acordo com a fórmula (10), a qual determina a diferença entre a métrica do trabalho $Metric_{ordem}$ e do transportador $Metric_{transp}$. As fórmulas (11) e (12) correspondem ao cálculo de cada uma das métricas de trabalho e de transportador respectivamente (Wenning, Rekersbrink, Timm-Giel, et al., 2006). Sendo d_1 a distância entre a localização atual do trabalho e a máquina em causa, e d_2 a distância restante até ao destinatário final (cliente) necessária para a conclusão daquele trabalho e C a capacidade de transporte.

$$Metric_m = \sum Metric_{ordem} - \sum Metric_{transp} \quad (10)$$

$$Metric_{ordem} = \frac{0.25^{d_1}}{d_2} \quad (11)$$

$$Metric_{transp} = C * 0.5^{d_1} \quad (12)$$

Os trabalhos selecionam então a rota que resulta num menor valor da métrica, e comunicam essa escolha, para que os recursos (máquinas) possam atualizar a sua disponibilidade (Wenning, Rekersbrink, & Timm-giel, 2006).

O método foi experimentado num ambiente de FFS, testando a influência (1) do número de máquinas paralelas; (2) do número de estágios produtivos (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010); (3) da taxa de chegadas de trabalhos ao sistema (B. Scholz-Reiter, Rekersbrink & Gorges, 2010); e (4) da influência de avarias nas máquinas (Katja Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). Os autores B. Scholz-Reiter, Rekersbrink, et al., (2010) observaram que o DLRP consegue manter o tempo total de percurso reduzido imitando o comportamento do método QLE, ao contrário dos métodos heurísticos com o qual foi comparado, que deterioraram-se com o aumento da dinâmica de chegadas de trabalhos. Para corroborar o desempenho observado, K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010), também observaram que este método consegue acompanhar os desempenhos dos métodos

QLE, LSIRP e *Holonis*, mesmo sob o efeito de aumentos do número de máquinas e estágios produtivos.

- **Bacterial Chemotaxis (CHE):** B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, et. al., (2010) inspiraram-se no comportamento da bactéria E.Coli procurando transpor a lógica inerente ao processo químico, para o controlo autónomo de produção. De forma similar às bactérias que podem detetar gradientes químicos para definir o seu movimento, também os trabalhos podem detetar alvos logísticos (e.g., reduzido tempo de percurso ou aderência à data de entrega) oferecidos pelos diferentes recursos alternativos e escolher um deles. Cada trabalho no espaço fabril decide sobre a sua rota de fabrico usando o pseudo algoritmo indicado na Figura 6, que emula o comportamento da bactéria E.Coli num espaço bidimensional.

A cada nova tomada de decisão o algoritmo é acionado, começando-se por definir aleatoriamente a variável y_0 , referente à atratividade (e.g., tempo de percurso). De seguida é calculado o gradiente g , de acordo com a posição y_n . A fórmula (13), corresponde a esse cálculo, sendo esse gradiente g usado para quantificação da concentração da bactéria, $CheYp(y_n)$ na posição y_n , seguindo a fórmula (14), onde $CheYp(y_{n-1})$, representa a concentração da bactéria na posição anterior a n .

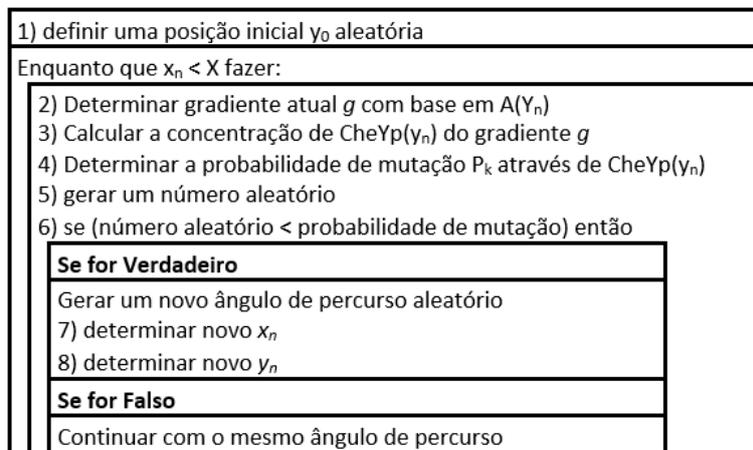


Figura 6 - Pseudo algoritmo do método CHE, adaptado de B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, et. al., (2010)

Por fim para perceber se não existirá uma troca de direção (mutação) para outra máquina paralela, terá que se calcular a probabilidade, P_k , que é dependente na concentração da bactéria calculada pela fórmula (14) e onde k influencia diretamente a probabilidade calculada, como se pode ver pela fórmula (15). P_0 é a probabilidade de mutação na primeira interação, sendo essa definida em 0.5 (B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, et. al., 2010). Este processo é repetido diversas vezes existindo assim várias interações, sendo estabelecido um limite mínimo de distância a percorrer, X , a qual a posição x_n terá que ser maior para concluir o processo de escolha. O modelo de decisão incide

sobre duas variáveis, o grau de probabilidade de mudança de direção, ou seja, de máquina e a concentração da bactéria.

$$g(y_n) = \frac{A(y_n)}{A(y_{n-1})} \quad (13)$$

$$CheYp(y_n) = CheYp(y_{n-1}) * g(y_n) \quad (14)$$

$$P_k(CheYp(y_n)) = \frac{1}{1 + e^{-k * CheYp(y_n)} * \left(\frac{1}{P_0} - 1\right)} \quad (15)$$

B. Scholz-Reiter, Gorges, Jagalski, et. al., (2010) testaram a sensibilidade da função de probabilidade da mutação, P_k , no modelo alterando o fator ao fator k , o qual influencia a possibilidade de mudança de direção dos trabalhos. Os autores concluíram que o fator k tem um grande impacto sobre o desempenho geral do método. Não existe testes comparativos a outros métodos na literatura encontrada.

- **One Logistics target per rule (OLTPR):** O método foi também desenvolvido pela *Collaborative Research Center (CRC)*. O principal conceito deste método passa pela ponderação adequada de diversas regras (sequenciamento e/ou de alocação) impostas aos trabalhos e/ou aos recursos, sendo que cada um destas procuram atingir um objetivo único. A tabela 2 contém uma amostra de possíveis regras (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010). Após o cálculo e ponderação da(s) diversa(s) regra(s), (e.g., ponderação entre o sinal emitido pelos recursos e a escolha da máquina com o menor tempo de percurso), o trabalho escolhe o recurso que corresponde ao maior valor. E é de seguida sequenciado nas máquinas de acordo com uma nova ponderação da(s) regra(s) considerada(s) para o efeito (e.g. menor data de entrega)

No conjunto dos artigos estudados da literatura constou-se que não existem estudos relativos ao desempenho do método.

Tabela 2 - Algumas regras e correspondentes objetivos que podem ser ponderados

Objetivo	Regra
Maior Utilização das Máquinas	O sinal emitido por cada máquina é tanto maior, quanto menor for o tamanho da fila de espera da máquina
Menor Tempo de percurso	Os trabalhos escolhem as máquinas que oferecem o menor tempo de percurso
Maior aderência às Datas de Entrega	Sequenciar os trabalhos nas máquinas pelas suas datas de entrega

- Bionic Manufacturing System (BMS):** Desenvolvido por Ueda, Hatono, Fujii, et. al., (2000) com o objetivo de imitar a evolução do ADN ao longo de gerações e a aprendizagem de um organismo ao longo da vida, BN-type. Para isso o método utiliza campos de atração, i.e., máquinas, que funcionaram como um “ímã” para os trabalhos em curso, em que cada campo tem um determinado ADN, que corresponde aos tipos de trabalhos, que irá evoluir de acordo com os trabalhos que foram atraídos e alocados a essa máquina. O BN-type, corresponde a uma regra que utiliza conceitos de *machine learning*, para informar ao transportador a próxima máquina que este deverá se dirigir (Ueda, Hatono, Fujii, et. al., 2000). Não é conhecido um algoritmo que proceda à implementação do método (K. Windt, Becker, Jeken, et al., 2010).

Classificação dos Métodos

A Tabela 3 resume e classifica os métodos APC encontrados na nossa amostra de 72 documentos.

Tabela 3 - Classificação dos métodos APC (adaptado de K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010) e estendido)

Dimensões	Atributos	Métodos APC													
		QLE	PHE	DWL	ANT	BEE	SRB1	SRB2	MARK ET	HOLON	LSIRP	DLRP	CHE	OLTPR	BMS
Tipo de Informação	Passada (Past)														
	Futura (Fut)	Fut	Past	Fut	Past	Past	Fut	Past	Past	Fut	Past	Past	Past	Mix	Mix
	Mista (Mix)														
Etapas de Planeamento	1														
	2														
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	4+	4+	4+	1	1	1
	4 ou mais (4+)														
Valores Artificiais	Não utiliza (Não)														
	Estático (Esta)	Não	Dina	Não	Dina	Esta	Não	Não	Dina	Dina	Não	Não	Dina	Não	Dina
	Dinâmico (Dina)														
Tipo de Comunicação	Trabalho - Máquina (Tra-Maq)														
	Trabalho - Trabalho (Tra-Tra)	Tra-Maq	Tra-Maq	Tra-Maq	Tra-Maq	Tra-Tra; Tra-Maq	Tra-Maq	Tra-Maq	Tra-Maq; Cent	Cent; Maq-Maq	Maq-Maq; Cent	Maq-Maq; Tra-Maq	Tra-Tra; Tra-Maq	Tra-Maq; Tra-Tra	Tra-Tra; Tra-Maq
	Máquina - Máquina (Maq-Maq)														
	Central (Cent)														
Complexidade Utilizada	Baixo (1-2)														
	Média (3-5)	Baixo	Média	Baixo	Baixo	Média	Baixo	Baixo	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixo	Média	Baixo
	Alta (5 ou mais)														
Decisor	Trabalho (Tra)														
	Máquina (Maq)	Tra	Tra	Tra;Maq	Tra	Tra	Tra	Tra	Tra; Maq; Cent	Maq; Cent	Maq	Tra; Maq	Tra	Tra; Maq	Tra
	Central (Cent)														
Armazenamento de Dados	Trabalho (Tra)														
	Máquina (Maq)	Maq	Maq	Maq	Maq	Maq	Maq	Maq	Tra; Maq; Cent	Maq; Cent	Maq; Cent	Maq	Tra; Maq	Tra; Maq	Maq
	Central (Cent)														

A classificação dos métodos é realizada de acordo com a classificação de K. Windt, Becker, Jeken, et al., (2010), com base em 7 dimensões, nomeadamente: (1) tipo de informação, passada, futura ou mista; (2) etapas de planeamento, ou seja o número de passos *look-ahead* utilizados para a decisão; Por exemplo o método pode levar em consideração o que pode acontecer duas, três ou mais etapas após a decisão pendente; (3) valores artificiais, i.e., a utilização de informação relativa a variáveis artificiais como, e.g., feromonas, para a tomada de decisão ou a utilização de variáveis não artificiais, e.g., lead time, as quais podem ser estáticas ou dinâmicas, dependendo do valor da variável mudar ou não com o passar do tempo; (4) tipo de comunicação, que indica como é feita a comunicação entre os objetos logísticos e/ou entre os objetos logísticos e uma eventual entidade central; (5) complexidade, em termos do número de variáveis usadas na tomada de decisão; (6) decisor, define quem toma a decisão – unidade

centralizada ou objetos logísticos; e (7) armazenamento de dados, indica onde os dados são guardados para posterior utilização.

Importa referir que na literatura existem outras de classificações, nomeadamente a de Schukraft, Grundstein, B. Scholz-Reiter, et. al., (2016) que classifica os métodos APC em quatro categorias: (1) rastreabilidade; (2) intensidade de planeamento; (3) objetivos logísticos e (4) reatividade do método.

2.5. Discussão da Literatura

Na análise da forma de funcionamento dos métodos APC acima apresentados verifica-se que a principal variável utilizada por estes métodos na tomada de decisão, em termos de alocação de trabalhos as máquinas paralelas, é o tempo de percurso (*throughput time*) em cada máquina. Este inclui o tempo de espera em fila e o tempo de processamento nas próprias máquinas. Alguns métodos usam dados históricos relativos a esta variável (tais como PHE, ANT) outros usam valores futuros ou estimativas (tais como QLE ou DWL). A variável tempo de percurso é ainda usada de forma direta por alguns métodos na tomada de decisão (QLE, SRB1, DD e DWL), ou então de forma indireta, no cálculo de valores artificiais que posteriormente são usados na tomada de decisão, tais como a concentração de feromona (PHE e ANT), a “qualidade” da máquina (BEE), a concentração de bactéria (CHE) e ainda moeda virtual (Holonix, Market).

Outras variáveis usadas pelos métodos para decisão, além do tempo de percurso, são o estado dos recursos (e.g., em avaria ou em processamento), o tempo de movimentação entre estágios produtivos (usado por exemplo nos métodos DLRP e LSIRP), o valor das normas de carga (usado no método DWL) e atrasos dos trabalhos (DD, LSIRP e Holonix). Contudo, a informação relativa à situação atual do sistema/máquina no que concerne ao tempo restante de processamento no momento da decisão, incluindo potenciais avarias (tempo restante de reparação), não tem sido considerado. No controlo de produção em *tempo real* poderá ser importante levar em consideração estes tempos no momento da tomada de decisão, como forma de aumentar a eficiência do método.

Os métodos APC têm sido testados sob a influência de diversos fatores do ambiente de produção, nomeadamente número de máquinas por estágio, número de estágios produtivos, diferentes distribuições para o intervalo de tempo entre chegadas de trabalhos ao sistema, disponibilidade das máquinas e tempos de *setups*. Contudo, o impacto de fatores como o grau de *interchangeability* (i.e., capacidade técnica das máquinas para realizar operações semelhantes (Henrich, Land, & Gaalman, 2007)) e a *Performance Efficiency* (i.e., a taxa a que as máquinas não nativas processam os trabalhos comparativamente com as máquinas nativas), não têm sido considerados. Pelo que é importante alargar o conjunto de situações e ambientes produtivos hipotéticos em que os métodos APC são testados e

comparados, antes de se proceder à sua introdução em ambiente real, para melhor se perceber o seu comportamento. Isto, em princípio, ajudará as empresas no processo de seleção do método APC mais adequado à sua situação produtiva.

Da análise da literatura verifica-se também que a forma como os trabalhos são sequenciados nas filas das máquinas (i.e., as regras de despacho) não têm sido objeto de estudo no âmbito do controlo autónomo. Na maioria dos estudos, os trabalhos são sequenciados pelas regras *First Come First Served* (FCFS) e *Due Date* (DD), pelo que será importante estudar o desempenho dos métodos APC sob a influência de outras regras de despacho. Constata-se ainda que os métodos têm sido testados essencialmente em ambientes hipotéticos, devido à fase embrionária em que se encontram, usando a *Flexible Flow Shop* (FFS), pelo que alargar a gama de configurações produtivas, incluindo e.g., *General Flexible Flow Shops* e *Flexible Job Shops*, poderá ajudar a compreender o desempenho dos APC num leque mais alargado de situações produtivas.

Por último, verifica-se que alguns métodos ainda não foram testados, nomeadamente o Market, o BMS e o OLTPR, ou que o seu desempenho não foi comparado com o de outros métodos, como acontece no caso do CHE.

3. ESTUDO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é apresentado o estudo de simulação realizado, envolvendo a caracterização do ambiente produtivo utilizado no modelo de simulação, para responder a um dos objetivos do trabalho, delineados na seção 1.2 “estudar o comportamento dos métodos APC em contextos produtivos diversos procurando estabelecer implicações para a prática industrial”. É ainda realizada uma descrição do plano experimental e das medidas de desempenho empregues. Por fim é realizada uma breve explicação da implementação no *software* de simulação dos diversos métodos APC testados.

Sendo assim, a seção 3.1 caracteriza os ambientes produtivos nos quais os métodos APC foram testados sendo posteriormente descritos, de forma sucinta, a sua implementação no *software* de simulação na seção 3.2. Por fim na seção 3.3 é apresentado o plano experimental do estudo e as medidas de desempenho consideradas.

3.1. Modelo de Simulação

Para responder ao objetivo acima mencionado, foram desenvolvidos dois modelos de simulação utilizando o *software* SIMIO™, nomeadamente de uma *Flexible Flow Shop* (FFS) e de uma *General Flexible Flow Shop* (GFFS). Estas duas configurações permitem testar o comportamento dos métodos APC em situações onde existem rotas alternativas para a produção dos produtos (i.e., quando existem máquinas paralelas em cada estágio). Em ambas as configurações existem seis estágios de produção, em que cada estágio contém três máquinas paralelas (alternativas) para a produção do produto, totalizando um total de 18 máquinas. As figuras 7 e 8 ilustram o fluxo de trabalhos nestas duas configurações. Em ambas o fluxo é unidirecional, contudo, enquanto na FFS os trabalhos passam obrigatoriamente em todos os estágios produtivos, na GFFS alguns dos trabalhos podem fazer *bypass* a alguns dos estágios produtivos.

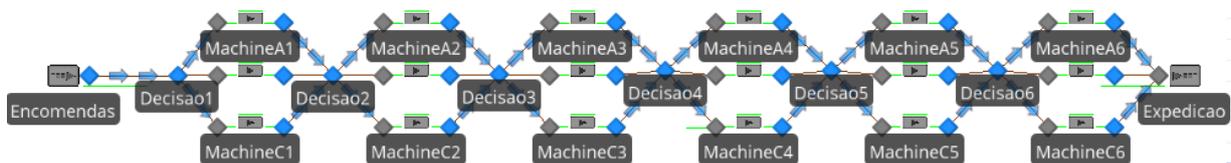


Figura 7 - Ambiente produtivo (FFS) modelado no software SIMIO

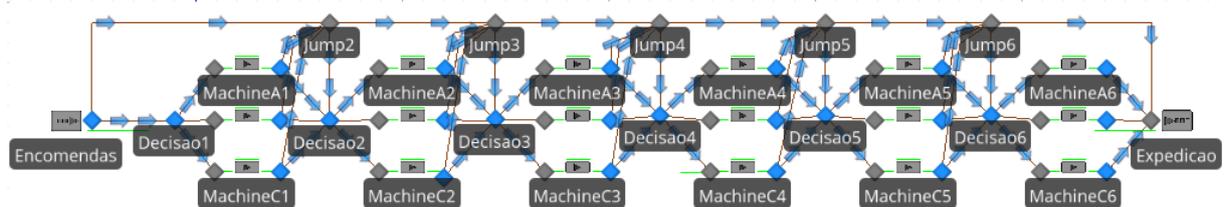


Figura 8 - Ambiente produtivo (GFFS) modelado no software SIMIO

Os roteiros de fabrico dos trabalhos, para a configuração GFFS, foram implementados no *software* SIMIO™ de acordo com o procedimento indicado na figura 9, ou seja, inicialmente é atribuído número de operações ao trabalho, de forma aleatória de acordo com a distribuição uniforme (1, 6) e de seguida é definido também de forma aleatória e com igual probabilidade o estágio onde cada uma das operações é realizada. E por fim os números gerados são reordenados de forma crescente. Uma ilustração completa do processo de geração de ordens de produção no modelo de simulação, na qual está incluída a atribuição de operações e estágios de processamento, está disponível no anexo II (para o ambiente GFFS). Enquanto o anexo III ilustra a geração de encomendas para o ambiente produtivo FFS.

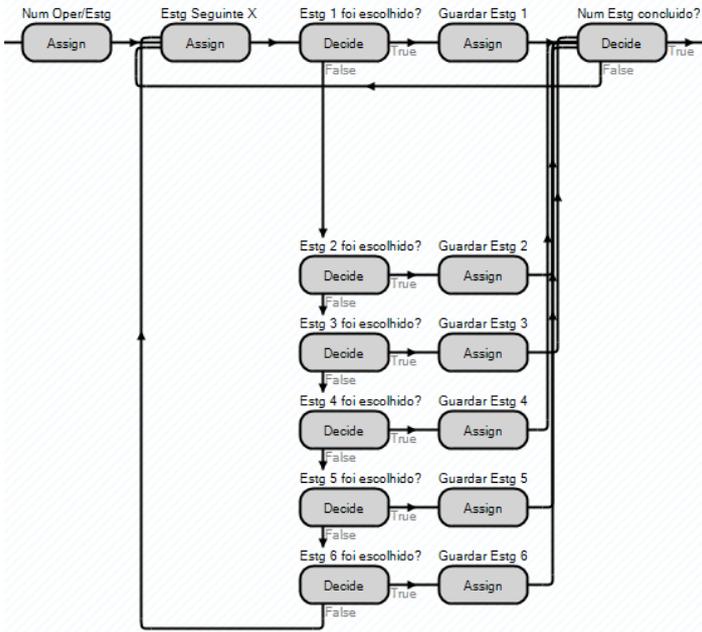


Figura 9 - Fluxograma de definição de operações a serem produzidas GFFS

Isto significa que o número médio de operações na GFFS é de 3,5 enquanto que o número de operações na FFS é de 6 para todos os trabalhos. Na FFS existe um total de $3^6 = 729$ possíveis rotas, enquanto que na GFFS existe um total $C(6, x) * 3^x = 4095$; $x \in \{1,2,3,4,5,6\}$.

Em ambas as configurações existem três tipos de produtos a serem produzidos (A, B e C). A cada tipo de produto está associada uma máquina “nativa” para a sua produção em cada estágio. Isto significa que o produto pode ser produzido com mais eficiência (i.e., envolvendo menos tempo) na sua máquina nativa. A realização da operação numa máquina diferente da nativa implica uma alteração do seu tempo de processamento. Isto é feito no modelo de simulação por alteração da taxa processamento (*Performance Efficiency*) da máquina, ver anexo IV.

Foram ainda tidos em consideração os seguintes pressupostos na construção dos modelos de simulação:

- Todos os materiais requeridos para a produção dos produtos encontram-se disponíveis no momento da chegada do trabalho ao sistema;
- As distâncias percorridas entre os estágios produtivos foram consideradas negligenciáveis.
- O tempo médio de processamento, PT , dos trabalhos nas máquinas nativas é de 1 hora e segue uma distribuição exponencial.
- O tempo médio entre avarias (MTBF – *mean time between failures*) segue uma distribuição exponencial de média 100 horas e o tempo médio de reparação (MTTR – *mean time to repair*) segue uma distribuição exponencial de 1 hora.
- O intervalo médio de tempo entre chegadas de trabalhos ao sistema, IAT , é definida de forma a resultar numa utilização das máquinas de 90%, de acordo com as fórmulas 16 e 17.

$$IAT = \frac{NumO * TMPS}{NumM * Util} \quad (16)$$

$$TMPS = IntCh * \left(\frac{PT + \left(\frac{PT}{Efficiency} \right) * (M - 1)}{M} \right) + (1 - IntCh) * PT \quad (17)$$

Onde $NumO$ e $NumM$ correspondem ao número medio de operações por trabalho e ao número total de máquinas disponíveis, respetivamente; $TMPS$, indica o tempo médio de processamento sob influência do grau de *Interchangeability* ($IntCh$) e da *Performance Efficiency* ($Efficiency$); e $Util$ se refere à percentagem de utilização das máquinas. O grau de *Interchangeability* refere-se à capacidade tecnológica dos recursos em realizar tarefas idênticas - ainda que as três máquinas existentes em cada estágio executem o mesmo tipo de operação, se a gama de produtos que pode ser processada por estas apenas se sobrepõe parcialmente, então o grau de *interchangeability* será inferior a 1, sendo definida no SIMIO™ aquando a geração de encomendas. A *Performance Efficiency* refere-se a uma percentagem que relaciona a taxa de processamento de uma máquina não nativa, com a taxa de processamento da máquina nativa. O M corresponde ao número de máquinas paralelas existentes em cada estágio.

As datas devidas de entrega do trabalho j , DD_j , são definidas de forma exógena aquando da chegada do trabalho, pela adição de uma folga gerada de forma aleatória, de acordo com a distribuição uniforme,

ao tempo de chegada do trabalho ao sistema ($T_{arrival}$). Na FFS a distribuição varia entre 35 e 55 horas, enquanto na GFFS varia entre 20 e 40 horas.

Tal como indicado nas figuras 7 e 8, em cada estágio o trabalho usa os nós designados de *Decisao* para seleccionar a máquina na qual o seu processamento irá ocorrer. Cada máquina no sistema de produção, contém dois *buffers*, o *buffer* de entrada e o *buffer* de saída. Estes são representados nas figuras por duas linhas verdes. O *buffer* de entrada refere-se à fila de espera dos trabalhos que aguardam processamento na máquina e o *buffer* de saída refere-se à fila de espera dos trabalhos que terminaram o seu processamento na máquina. Após os trabalhos terminarem o seu processamento no sistema são imediatamente expedidos para o cliente, isto é representado no modelo pelo objeto *Expedicao*.

3.2. Controlo do Fluxo de Materiais

Para o controlo do fluxo de materiais no espaço fabril são usados métodos autónomos de controlo da produção (APC) os quais são responsáveis, em cada estágio, pela selecção da máquina, e regras de despacho, as quais são responsáveis, em cada máquina, pela sequenciação dos trabalhos que se encontram em fila de espera.

Os métodos APC usados no estudo foram os seguintes: Pheromone (PHE) e *Queue Length Estimator* (QLE), que foram seleccionados pela simplicidade de funcionamento e potencial de desempenho. As figuras 11, 12 e 13 ilustram como estes foram implementados no software SIMIO.

No caso do método PHE a fórmula usada para fazer a evaporação das feromonas é a fórmula 3. A constante E (na figura 10 representada por *Evap*) usada no estudo teve o valor de 0.5, que representa uma ponderação idêntica da concentração de feromona existente e da concentração de feromona depositada pelo último trabalho, de acordo com a fórmula 5. Contudo, de forma a obter valores não nulos no arranque da simulação foi necessário definir a concentração inicial das feromonas em cada máquina. Esta foi definida como sendo de 1 em todas as máquinas, valor que diz respeito ao tempo médio de processamento.

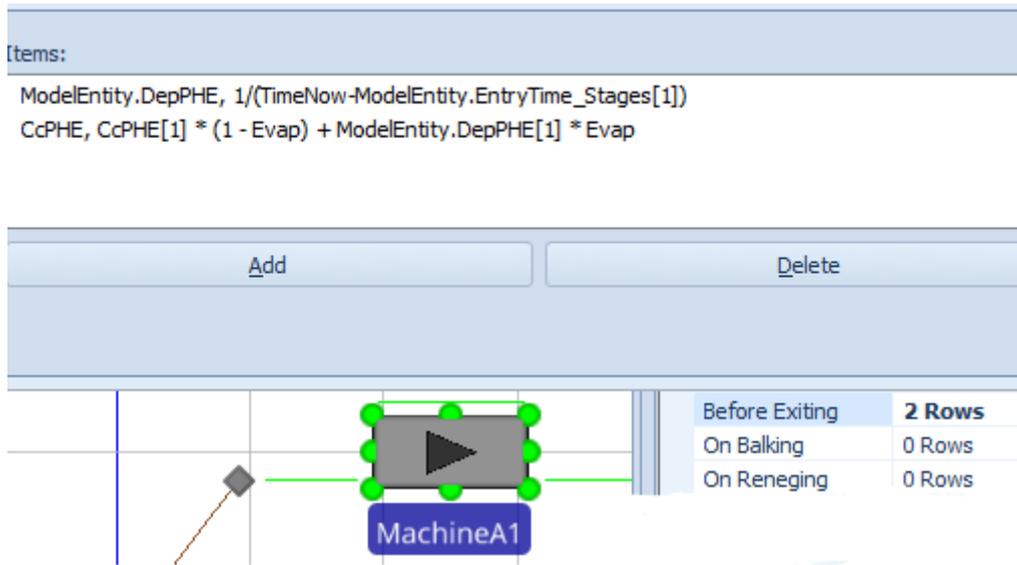


Figura 10 - Representação da implementação das fórmulas (3) e (5) no software SIMIO para a máquina A1

A tomada de decisão do método PHE tem uma base probabilística, como indicado no capítulo 2. Contudo, sempre que existem máquinas sem trabalhos em fila de espera, a seleção só incide sobre as máquinas que se encontram disponíveis (Fernandes, Martins & Carmo-silva, 2018), isto porque devido à característica probabilística, o trabalho poderia selecionar uma máquina ocupada em detrimento de uma desocupada, o que levaria à perda de capacidade. Para tal alterou-se a fórmula 2 como indicado nas fórmulas 18 e 19 com a introdução de uma variável binária, MO_m , referente o estado da máquina. Esta variável toma o valor 0 se a máquina estiver em funcionamento e 1 caso contrário. A figura 11 ilustra a implementação realizada no *software*. Sendo a fórmula 19 usada para a tomada de decisão como se pode observar na figura 12. A $P_{C_{m(t)}}$, representa a probabilidade calculada para cada máquina m no instante t . O momento da decisão em cada estágio é marcado pelas duas figuras 11 e 12

$$P_{C_{m(t)}} = \left(\frac{CcPHE_{m(t)}}{\sum_{m=1}^3 CcPHE_{m(t)}} \right) * MO_m \quad (18)$$

$$P_{C_{m(t)}} = P_{m(t)} * MO_m \quad (19)$$

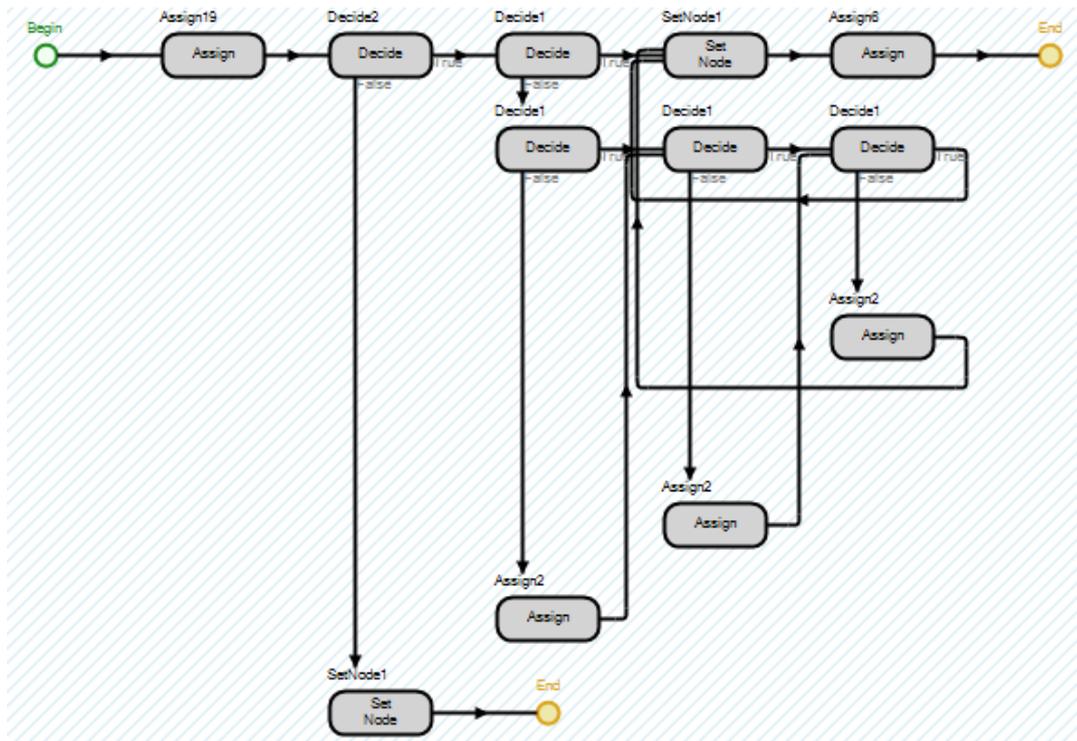
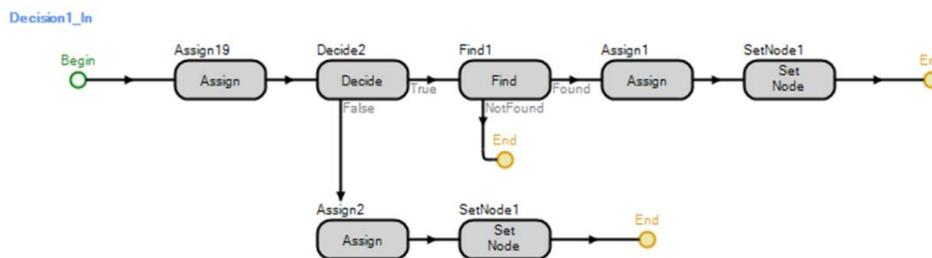


Figura 11 - Fluxograma para definição das variáveis binárias MO

Node	Prob
Input@MachineA1	$P[1] * MO[1]$
Input@MachineB1	$P[2] * MO[2]$
Input@MachineC1	$P[3] * MO[3]$

Figura 12 - Implementação da fórmula 18 no software SIMIO



QLE_Stage1, QLE_Stage1[1]-ModelEntity.ProcessTime_Stage[1]

Add Delete

MachineA1

On Entering	0 Rows
Before Processing	1 Row
After Processing	0 Rows
Before Exiting	0 Rows
On Balking	0 Rows
On Rejection	0 Rows

Figura 13 - Implementação no software SIMIO do método QLE

No que diz respeito ao método QLE, nenhuma alteração foi efetuada comparativamente ao enunciado na seção 2.4.1 e a sua implementação está representada na figura 13.

Todos os processos utilizados para a modelação dos métodos PHE e QLE no *software* de simulação SIMIO encontram-se nos anexo V e VI respetivamente (a implementação destes métodos é semelhante na FFS e na GFFS), sendo apenas ilustrado o primeiro estágio, pela semelhança de processos nos restantes estágios de produção.

Foi ainda considerado no estudo o método RANDOM de seleção da máquina em cada estágio de forma aleatória para efeitos de *benchmark*.

No que concerne ao despacho, este define a forma pela qual trabalhos em fila de espera de cada máquina são selecionados para processamento sempre que a máquina fica livre. Existem diversas regras de despacho disponíveis na literatura (Awate & Saraph, 1997; Brah, 1996; Horng & Chou, 2002). Neste estudo são consideradas as seguintes regras:

- *Shorter Processing Time* (SPT);
- *Operation Due Date* (ODD);
- *Modified Operation Due Date* (MODD);
- *First Come First Served* (FCFS);
- *Slack per Remaining Job Throughput Time e Shortest Processing Time* (S/RTT+SPT).

A regra **FCFS** ordena os trabalhos em fila de espera de acordo com o momento em que se estes associaram à fila de espera. É usada para efeito de benchmarking no nosso estudo. A regra **SPT** ordena os trabalhos em fila de espera de acordo com o tempo de processamento destes na máquina em causa. Selecionando para processamento o trabalho com menor tempo de processamento. A regra **ODD** é obtida por escalonamento regressivo a partir da data de entrega do trabalho, usando os tempos de percurso, throughput times, dos estágios produtivos ainda não concluídos. É selecionado para processamento o trabalho em fila de espera com a ODD menor. A regra **MODD** seleciona para processamento o trabalho com o valor mínimo, do máximo de dois valores por trabalho. Esses dois valores são: (1) a data planeada de conclusão da operação para o trabalho j , já descrita anteriormente (operation due date, ODD) e (2) tempo mais cedo de conclusão da operação, que corresponde à soma entre o tempo atual de simulação e o tempo de processamento do trabalho na máquina em questão. Ou seja, $\max(ODD_j; t + PT_{mj})$ para uma operação com tempo de processamento PT_{mj} e onde t se refere ao momento em que a decisão de despacho é tomada. A regra **S/RTT+SPT** corresponde a uma adaptação da regra *Slack per Remaining Work and Shortest Processing Time* (S/RPT+SPT) proposta por Brah, (1996) onde a

componente RPT (obtida com base no tempo de processamento das operações ainda não concluídas), é substituído pela componente RTT, ou seja, pelo tempo de percurso das operações ainda não realizadas. A regra seleciona o trabalho com o valor mínimo, do máximo de dois valores, de acordo com a fórmula 20:(1) o tempo de processamento do trabalho j na máquina m , PT_{mj} , (2) a multiplicação de um coeficiente de urgência pelo tempo de processamento do trabalho j na máquina m , PT_{mj} . O coeficiente de urgência, é obtido pelo rácio entre a folga do trabalho (dada pela diferença entre data de entrega do trabalho j DD_j , o momento de tomada de decisão t , o tempo de processamento do trabalho j nessa máquina m , PT_{mj} , e o tempo de percurso das operações ainda não realizadas, Op , no trabalho j , $\sum_{n=Op}^{Op} TT_{nj}$, onde n representa o número da operação), e o tempo restante de percurso, dado pela adição do somatório dos tempos de percurso das operações ainda não realizadas e o tempo de processamento do trabalho j na máquina m .

$$\max(PT_{mj}; \frac{DD_j - t - (PT_{mj} + \sum_{n=Op}^{Op} TT_{nj})}{PT_{mj} + \sum_{n=Op}^{Op} TT_{nj}} * PT_{mj}) \quad (20)$$

Algumas destas regras, nomeadamente, ODD, MODD e S/RTT+SPT, utilizam informação do tempo estimado de percurso por estágio n , *throughput time*, $TT_{n(t)}$. O cálculo desta variável neste estudo é baseado num alisamento exponencial, de acordo com a fórmula (21). Esta fórmula tem em consideração os valores já registados dos tempos de percursos no estágio n $TT_{n(t-1)}$ e o valor registado para o tempo de percurso do último trabalho que lá passou, dado pela diferença entre tempo de saída do estágio n do trabalho j , T_Sai_{nj} , e o tempo de entrada de j nesse estágio n , T_Ent_{nj} . O parâmetro α é a constante de alisamento. Após a realização de alguns testes, afim de escolher o melhor valor de α para que o desempenho do sistema fosse o mais positivo, (que se encontram no Anexo VII) foi adotado o valor de 0.9.

$$TT_{n(t)} = (1 - \alpha) * (T_Sai_{nj} - T_Ent_{nj}) + \alpha * TT_{n(t)} \quad (21)$$

3.3. Plano Experimental e Medidas de Desempenho

Por forma a testar o comportamento dos métodos de APC em diferentes situações produtivas foram considerados os seguintes fatores experimentais: configuração produtiva, método APC, regra de despacho, *Performance Efficiency* e grau de *interchangeability*. A tabela 4 apresenta todos os fatores

experimentais e níveis a que foram testados. A configuração produtiva foi testada a dois níveis: FFS e GFFS. O teste dos métodos APC na GFFS foi identificado na revisão da literatura realizada no capítulo 2 como uma lacuna. Os métodos APC foram testados a 3 níveis: QLE, PHE e RANDOM. A regra de despacho foi testada a 5 níveis: FCFS, SPT, ODD, MODD e S/RTT+SPT, uma vez que foi identificado no capítulo 2 que existe uma lacuna neste âmbito. A *Performance Efficiency* foi testada a três níveis de acordo com os seguintes níveis de eficiência 100%, 90% e 80%. Em cada estágio existem máquinas “nativas” ou especializadas para cada trabalho, tal como referido anteriormente. Por exemplo, um trabalho com um tempo de processamento de 1 hora numa máquina nativa, passa a ter um tempo de processamento de 1,1 hora numa máquina alternativa, se a *Performance Efficiency* for de 0.9 (90%). O grau de *Interchangeability* foi testado em três níveis 100%, 50% e 25%. O nível de 50%, por exemplo, significa que 50% dos trabalhos podem ser processados nas 3 máquinas do estágio, sendo os restantes 50% processados nas suas máquinas nativas.

Tabela 4 - Fatores experimentais e níveis testados

Parâmetros	Níveis				
Configuração Produtiva	FFS			GFFS	
Metodos APC	QLE		PHE	RANDOM	
Regras de Despacho	FCFS	SPT	ODD	MODD	S/PRT+SPT
Performance Efficiency	100%		90%	80%	
Grau de Interchangeability	100%		50%	25%	

Isto resulta num plano experimental de fatorial completo com 270 cenários. Cada cenário foi replicado 100 vezes. Os resultados para cada medida de desempenho foram recolhidos para um tempo de simulação de 13000 horas excluindo um período de inicialização (*warm-up*) de 3000 horas, sendo os intervalos de precisão obtidos com base num nível de confiança estatístico de 95%. A análise de resultados nos próximos capítulos é baseada no valor da média desses intervalos, sendo que nos anexos VIII e IX se apresentam os valores médios e os respetivos intervalos de precisão. Para a obtenção dos resultados destes cenários, utilizou-se um computador com um processador de terceira geração da Intel® Core (Intel® Core™ i3-2328M) com 2.20Ghz, acompanhado com 4 GB DDR3 de memória RAM. Neste estudo foram usadas 5 medidas de desempenho, nomeadamente: (1) percentagem de trabalhos em atrasado, (2) *Lateness*, (3) *Tardiness*, (4) tempo total no sistema e (5) a utilização das máquinas. A utilização das máquinas é obtida em percentual, e têm o intuito de informar a percentagem de tempo

em que a máquina esteve a executar a tarefa de processamento de trabalhos. O Tempo Total no Sistema (*Total Throughput Time* - TTT) define o tempo decorrido entre a chegada do trabalho ao sistema e a sua conclusão (entrega ao cliente). Quando minimizado significa melhores prazos de entrega ao cliente e menores períodos em que o dinheiro se encontra investido na forma trabalho em curso (*Work-In-Process*: WIP). A percentagem de trabalhos em atrasado (*Ptardy*) é usada como o principal indicador de desempenho neste estudo. Indica a percentagem de trabalhos que concluíram o seu processamento no sistema após a data de entrega devida. A *Lateness* L_j regista o valor do atraso dos trabalhos, o qual pode ser positivo (trabalho foi entregue com atraso), zero (trabalho entregue exatamente na data acordada) ou negativo (trabalho entregue antes da data de entrega). O cálculo é feito para cada trabalho j , subtraindo a data de entrega devida data de entrega, DD_j , a data de conclusão do trabalho C_j :

$$L_j = C_j - DD_j \quad (22)$$

A *Tardiness*, T_j , refere-se à média dos atrasos positivos e é obtido pela seguinte fórmula:

$$T_j = \max\{C_j - DD_j, 0\} \quad (23)$$

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Após a caracterização do modelo de simulação, do plano experimental e das medidas de desempenho usadas, procede-se neste capítulo à análise dos resultados obtidos. Na secção 4.1 são analisados os resultados dos métodos APC para a configuração *Flexible Flow Shop* (FFS) e na secção 4.2 são analisados os resultados para a configuração *General Flexible Flow Shop* (GFFS). Para tal começamos em cada uma destas secções por apresentar os resultados para os 3 métodos estudados, RANDOM, QLE e PHE, quando a regra de despacho FCFS é usada para sequenciar os trabalhos nas máquinas e quando os graus de *interchangeability* e *performance efficiency* são de 100%. Posteriormente analisa-se o impacto de cada um destes fatores (regra de despacho, *interchangeability* e *performance efficiency*) no desempenho dos métodos.

4.1. Resultados para a FFS

A figura 14 apresenta um gráfico com os resultados obtidos para o desempenho dos métodos APC no cenário base acima definido, i.e., quando o despacho é baseado na regra FCFS e os graus de *interchangeability* e *performance efficiency* são de 100%.

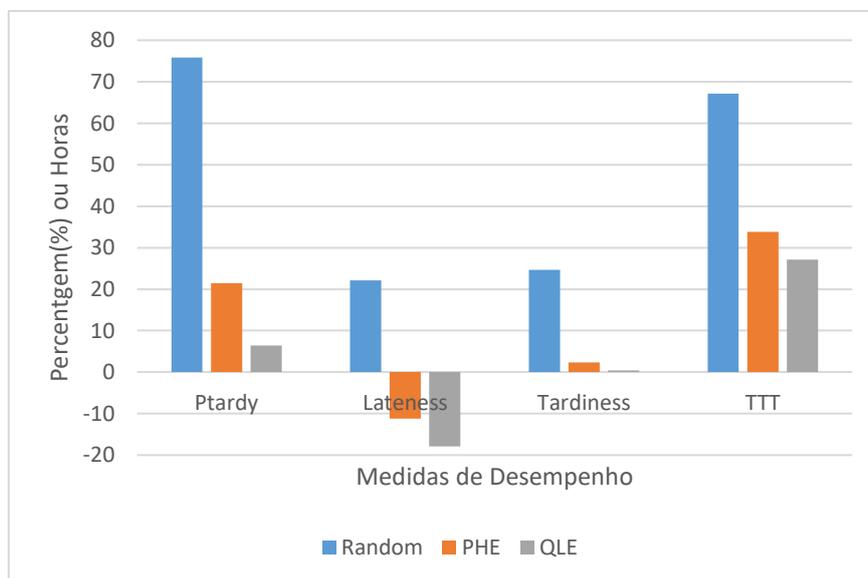


Figura 14 – Desempenho dos diversos métodos APC para o cenário base numa FFS

Como podemos observar o desempenho dos métodos APC (PHE e QLE) é substancialmente melhor do que o desempenho do método RANDOM. Em termos de percentagem de trabalhos atrasados constata-se que o método PHE (figura 14) permite uma diminuição dos trabalhos em atraso de 54 pontos percentuais em comparação com o método RANDOM (figura 14) passando a percentagem de trabalhos

em atraso de 75,8% para cerca de 21,4%, enquanto que o método QLE permite ainda uma maior redução da percentagem de trabalhos em atraso, 15 pontos percentuais, passando para os 6,5%. Esta redução da percentagem dos trabalhos em atraso é acompanhada pela redução do tempo de percurso no sistema (TTT). O método das PHE reduz esse tempo para cerca 33,81 horas, enquanto que no método QLE, reduz o TTT para cerca 27,12 horas. O *tardiness* (atraso positivo) diminuiu de 24,65 horas, no RANDOM, para 2,32 horas, no método das feromonas e para apenas 0,45 horas no método QLE. O *lateness* passa de 22 horas no método RANDOM significa que em média os trabalhos estão a ser entregues com um atraso de 22 horas, enquanto os valores negativos de atraso nos métodos PHE e QLE, significam que em média o trabalho é entregue antecipado: 11 horas no método PHE, e de 17,88 horas no método QLE.

Portanto, como se pode observar, o método QLE consegue obter melhores resultados para o cenário base considerado.

4.1.1. Impacto da Regra de Despacho

A figura 15 apresenta os resultados obtidos para o impacto da regra de despacho no desempenho dos métodos APC, quando os restantes fatores experimentais, são mantidos nos níveis considerados no cenário base. Os resultados obtidos quando os níveis dos restantes fatores experimentais são alterados encontram-se no anexo VIII. Contudo, o desempenho relativo dos métodos não é alterado, pelo que não são aqui apresentados.

Pode-se observar na figura 15 que a regra de despacho S/RTT+SPT é a que obtém o melhor desempenho no que diz respeito à percentagem de trabalhos em atraso, independentemente do método APC usado. Esta regra permite reduzir as percentagens de trabalhos em atraso nos métodos RANDOM, PHE e QLE para 9,16%, 3,33% e 0,97%, respetivamente. No que concerne ao TTT, a regra SPT obtém o melhor resultado, com um tempo de 26,3 horas, enquanto que a regra de despacho S/RTT+SPT resulta num tempo de 33,16 horas. Essa diferença entre as medidas de desempenho pode ser explicada pelo coeficiente de urgência usado pela regra S/RTT+SPT, que atribui prioridade aos trabalhos que se tornam mais urgentes, mas que ainda não se encontram em atraso, adiando desta forma o processamento dos trabalhos que já se encontram em atraso. Isto é corroborado pelo aumento da média dos atrasos (*tardiness*) em todos os métodos APC. Relativamente ao *lateness* o método RANDOM apresenta uma média de atrasados negativos (ou seja, trabalhos que se encontram adiantados relativamente à data planeada de entrega) de 18,68 horas quando SPT é aplicada, contudo esse valor diminui para 11,83

horas se a regra S/RTT+SPT for aplicada. No caso dos métodos PHE e QLE o comportamento é idêntico no que concerne ao *lateness*.

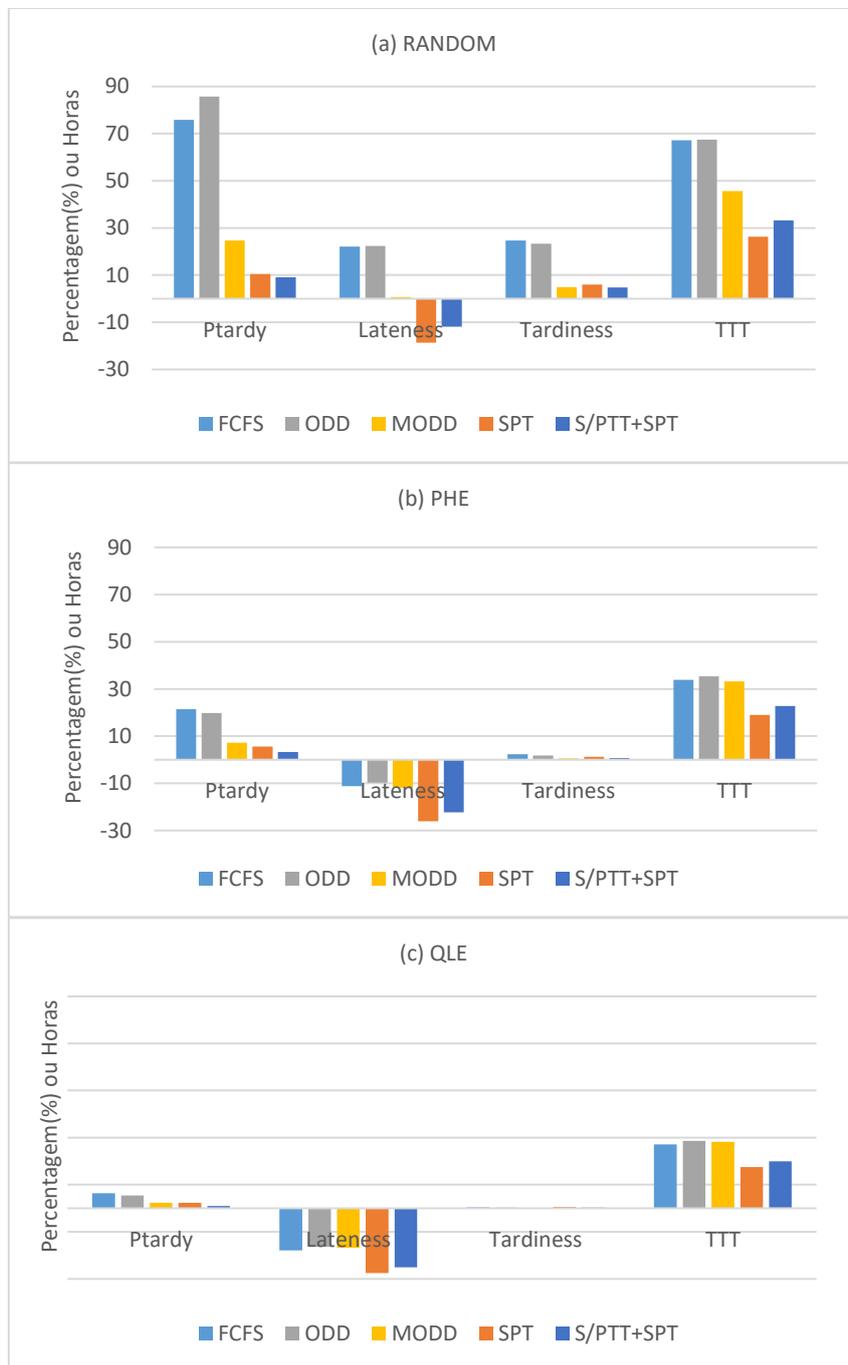


Figura 15 – Impacto da regra de despacho no desempenho dos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na FFS

4.1.2. Impacto da *Performance Efficiency*

Como referido no capítulo 3 a *Performance Efficiency* foi testada em três níveis, 100%, 90% e 80%. A figura 16 apresenta o impacto deste fator nos diversos métodos APC utilizados, quando o grau de

interchangeability é de 100% e a regra de despacho FCFS (i.e., nas condições do cenário base). Da mesma forma, os resultados obtidos quando os níveis dos restantes fatores experimentais são alterados encontram-se no anexo VIII. Contudo o desempenho relativo dos métodos não é alterado, pelo que não são aqui apresentados.

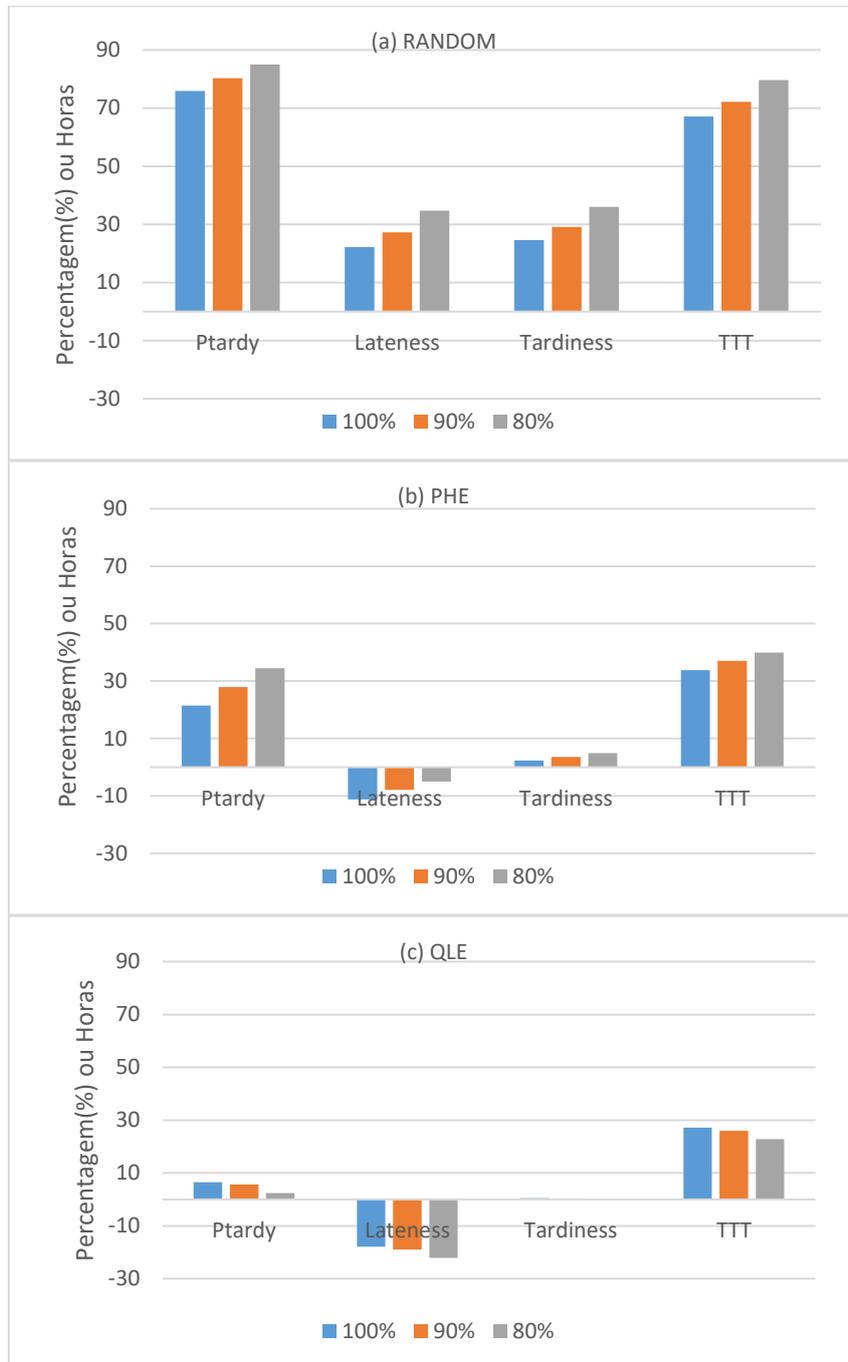


Figura 16 – Impacto da Performance Efficiency nos métodos APC: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na FFS

Pela figura 16 observa-se que o desempenho relativo dos três métodos se mantém, ou seja, o método PHE (figura 16-b) continua a desempenhar melhor que o RANDOM (figura 16-a), enquanto que o QLE (figura 16-c) desempenha melhor que o PHE.

Como se pode observar, a diminuição da *performance efficiency* tem uma influência negativa no desempenho do sistema, quando os métodos RANDOM e PHE são usados. A diminuição da *performance efficiency* de 100% para 90% resulta num aumento do tempo médio de processamento de 1 hora para 1.07 horas. Se a *performance efficiency* for de 80% então o tempo médio de processamento passa para 1.16 horas de acordo com a fórmula (16). Este impacto no tempo médio de processamento afeta sobretudo o desempenho do método RANDOM, uma vez que faz a alocação dos trabalhos às máquinas de forma completamente aleatória. Este aumento do tempo médio de processamento afeta também o método PHE, o qual também baseia a sua decisão numa informação que não representa o estado atual do sistema e sobre uma base probabilística.

Este aumento do tempo médio de percurso, é também repercutido no TTT, o qual aumenta 12,5 horas para o RANDOM e 7 horas para o PHE. Ainda assim, o método PHE continua a desempenhar melhor que o método base RANDOM.

No que concerne ao método QLE, este desempenha de forma oposta, i.e., a diminuição da *performance efficiency* resulta numa melhoria de desempenho do sistema. Ou seja, a percentagem de trabalhos em atraso quando a *performance efficiency* é de 80% diminui 4 pontos percentuais relativamente a uma *performance efficiency* de 100%. As restantes medidas de desempenho comportam-se em conformidade, o TTT diminuiu 4,5 horas, o atraso médio dos trabalhos atrasos diminuiu 0,3 horas e o *lateness* 4,3 horas.

Este desempenho pode ser explicado pela capacidade do método em realizar uma “boa” alocação dos trabalhos tirando proveito de uma menor chegada de trabalhos – como explicado no capítulo 3, o intervalo de tempo entre chegadas de trabalhos ao sistema, *IAT*, é obtido com base na fórmula 16. Esta leva em consideração o tempo médio de processamento, o qual é influenciado pela *performance efficiency*, ou seja: uma *performance efficiency* menor resulta num tempo médio de processamento maior, que por sua vez resulta num intervalo entre chegadas de trabalhos ao sistema também maior. Este ajuste no *IAT* é feito nos modelos de simulação por forma a criar condições de comparabilidade entre os diferentes cenários experimentais que resultem numa utilização de 90% nas máquinas. Contudo, este valor de utilização é teórico, na medida em que depende da forma como o método procede à alocação dos trabalhos entre máquinas nativas e não nativas. Ou seja, a utilização de 90% ocorre apenas para uma alocação igual, em termos percentuais, dos trabalhos às 3 máquinas do estágio produtivo.

Caso o método consiga fazer uma melhor alocação, a utilização das máquinas será inferior a 90%. É isto que acontece com o método QLE, como se pode ver pela figura 17. A melhoria observada na utilização das máquinas justifica a melhoria observada no desempenho do método ao nível das restantes medidas de desempenho.

Isto não acontece no método PHE, uma vez que possui uma componente probabilística na tomada de decisão, obtida com base em informação do passado, não lhe permitindo realizar uma alocação tão eficiente dos trabalhos, conducente a uma melhoria da utilização das máquinas.

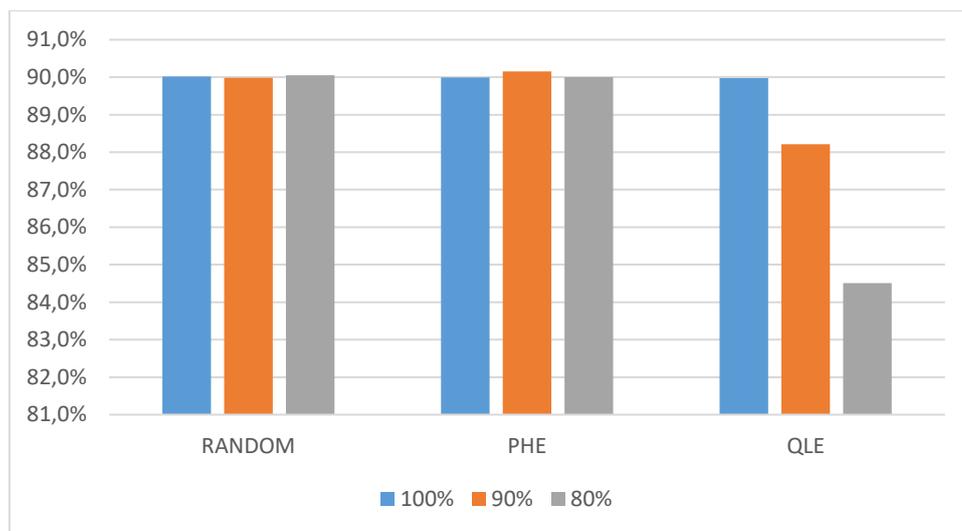


Figura 17 - Impacto da performance efficiency no desempenho dos métodos em termos utilização das máquinas no cenário base e na FFS

4.1.3. Impacto do grau de *Interchangeability*

A figura 18 apresenta os resultados obtidos para o cenário base, quando o grau de *interchangeability* é testado a três níveis, 100%, 50% e 25%. A análise ao impacto do grau de *interchangeability* terá em conta dois cenários diferentes: o cenário base, onde a *performance efficiency* é de 100% e um segundo cenário onde a *performance efficiency* é de 80%. Esta análise com dois cenários diferentes tem o objetivo de englobar todos os comportamentos relevantes obtidos com a alteração da *interchangeability*.

Como se pode observar o grau de *interchangeability* não influencia o desempenho do método RANDOM, ao contrário do que acontece nos restantes métodos. No método RANDOM (figura 18-a), as medidas de desempenho mantêm-se relativamente inalteradas, rondando os 76% de trabalhos em atraso e cerca de 67 horas de tempo total de percurso. Este desempenho do método RANDOM fica a dever-se ao facto de as máquinas paralelas terem o mesmo tempo médio de processamento, independentemente de se tratar

da máquina não nativa, pelo que a atribuição aleatória dos trabalhos, não altera o desempenho do sistema de produção.

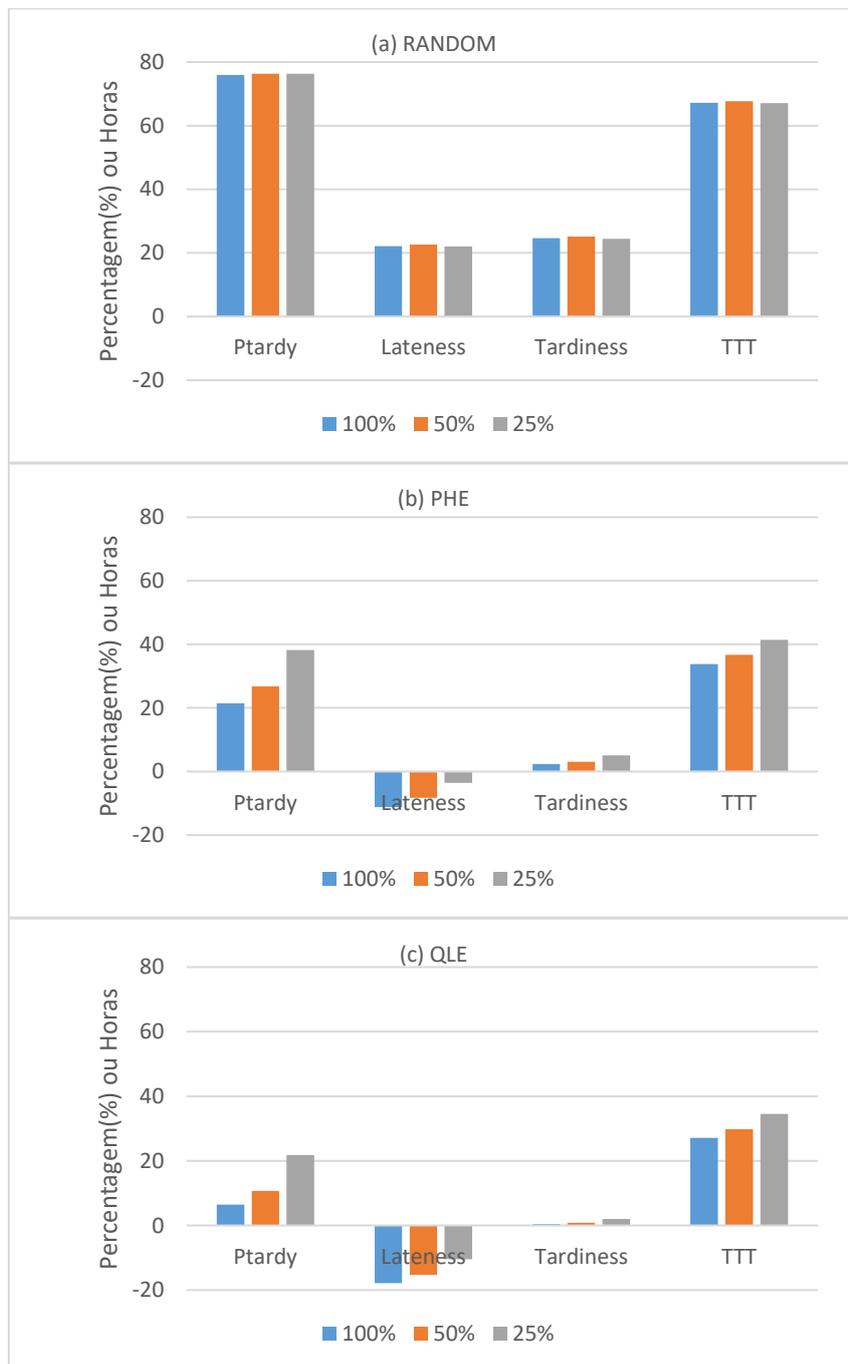


Figura 18 – Impacto do grau *interchangeability* para o cenário base nos métodos: (a) *RANDOM*; (b) *PHE*; (c) *QLE* na configuração *FFS*

Tal não acontece com os métodos APC que utilizam informação dos tempos de percursos para a tomada de decisão (*PHE* e *QLE*), tendendo o desempenho a degradar-se com a redução do grau de *interchangeability*. Isto acontece porque o número de opções para a alocação dos trabalhos às máquinas se reduz com a redução do grau de *interchangeability*. A figura 18-(b) e 18-(c), ilustra esse comportamento para os diferentes níveis de *interchangeability* nos métodos *PHE* e *QLE*. O desempenho

destes métodos em termos de percentagem de trabalhos em atraso passa de 6,46% (quando a *interchangeability* de 100%) para 21,83% (quando a *interchangeability* de 25%), no caso do QLE, e de 21,44% para 38,2% no caso do método PHE. Também se observa este comportamento nas restantes medidas de desempenho. O comportamento é similar em todas para todas as regras de despacho, como pode ser observado no anexo VIII, pelo que os resultados não são aqui apresentados.

No segundo cenário (figura 19), o método QLE mantém o seu comportamento, ou seja, o seu desempenho piora para graus de *interchangeability* menores (figura 19-c), o que é explicado pela redução do número de oportunidade de alocação dos trabalhos a máquinas alternativas, obrigando que muitos destes sejam processados nas máquinas nativas, não tirando partido de eventuais reduzidas filas de espera nas máquinas não nativas. Contudo, tal não acontece nos restantes métodos. No método RANDOM (figura 19-a) observa-se uma pequena melhoria de todas as medidas de desempenho. Por exemplo a percentagem de trabalhos atrasados passa de 13,32% para os 10,57% por alteração do grau de *interchangeability* de 100% para 25%. Tal é explicado pelo facto de as máquinas paralelas terem um grau de eficiência menor que o das máquinas nativas (i.e., 80%), pelo que a seleção aleatória das máquinas se torna menos vantajosa quando o grau de *interchangeability* é de 100%. Um grau de *interchangeability* menor limita a possibilidade de atribuição dos trabalhos a máquinas não nativas e como tal melhora o desempenho do sistema quando a decisão é tomada de forma aleatória. Este comportamento verifica-se em todas as regras de despacho utilizadas, ou seja, é independente da regra de despacho, como se pode verificar pelo anexo VIII.

No que concerne ao método PHE (figura 19-b), verifica-se uma ligeira melhoria do desempenho do método para graus de *interchangeability* menores, devido à tomada de decisão probabilística. Quando o grau de *interchangeability* passa de 100% para 50%, a percentagem de trabalhos em atraso melhora em cerca de 0,6 pontos percentuais, contudo, se reduzirmos o grau de *interchangeability* para 25% vê-se um aumento de 8 pontos percentuais nessa mesma medida. Por um lado, uma redução do grau de *interchangeability* conduz a um melhor desempenho do método por restringir o número de alternativas quando a decisão contém uma componente probabilística. Contudo, por outro lado, a redução do número de oportunidade de alocação dos trabalhos as máquinas não nativas que no momento da tomada de decisão têm uma fila de espera menor, e que, portanto, apresentam menores tempo de percurso, piora desempenho do método. Assim o comportamento deste método fica dependente destas duas situações, o que resulta numa melhoria do seu desempenho, quando o grau de *interchangeability* é inicialmente reduzido, para depois voltar a piorar, quando se procede a uma redução adicional do grau de *interchangeability*.

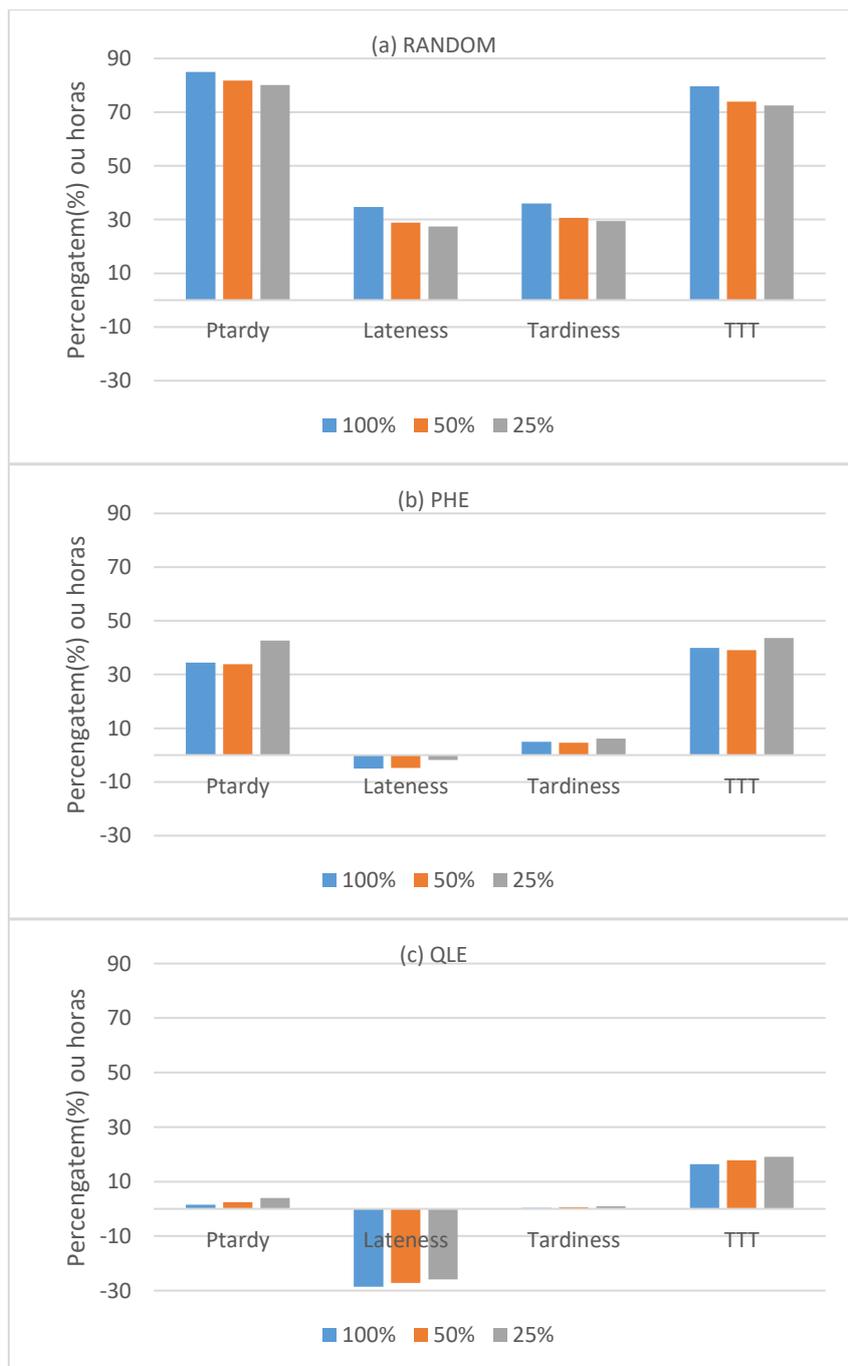


Figura 19 – Impacto do grau de interchangeability nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na FFS para uma performance efficiency de 80%

4.1.4. Melhor cenário para cada método

Assumindo a percentagem de trabalhos em atraso como a principal medida de desempenho no estudo, apresenta-se na figura 20 o desempenho de cada um dos métodos no seu melhor cenário. Isto permite comparar o desempenho dos métodos de uma forma mais “justa”.

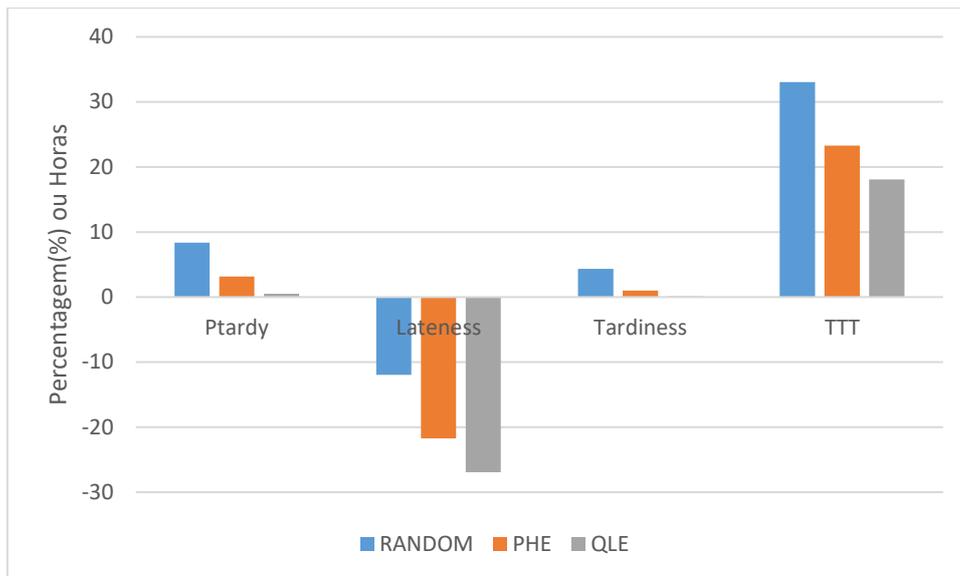


Figura 20 - Desempenho de cada método para o melhor cenário na FFS

No método RANDOM, o melhor cenário é obtido conjugando a regra de despacho S/RTT+SPT, com um grau de *interchangeability* de 25% e uma *performance efficiency* de 100%. Essa combinação permite obter uma *performance* de 8,4% de trabalhos em atraso, e um TTT de 33,05 horas.

No método PHE o melhor cenário resulta da combinação regra de despacho S/RTT+SPT com um grau de *interchangeability* de 50% e uma *performance efficiency* de 100%. Combinando esses valores obtemos uma percentagem de trabalhos atrasados de 3,1%, o que corresponde a uma melhoria de 5,3 pontos percentuais relativamente ao melhor desempenho do método RANDOM, e também permite uma melhoria de 10 horas no que toca ao TTT, alcançando os 23,28 horas de tempo de percurso no sistema. Finalmente no método QLE o melhor cenário é obtido conjugando novamente a regra de despacho S/RTT+SPT, com um grau de *interchangeability* de 100% e uma *performance efficiency* de 80%. Isto permite uma percentagem de trabalhos em atraso bastante reduzida, de 0,5%, e um tempo total de percurso de 18,07 horas que comparativamente ao método PHE corresponde a uma melhoria de 2,5 pontos percentuais na percentagem de trabalhos em atraso e de 5 horas no tempo de percurso.

Conclui-se assim que o QLE apresenta o melhor desempenho no que concerne a percentagem de trabalhos em atraso

4.2. Resultados para a GFFS

A presente seção apresenta os resultados quando a configuração produtiva é a GFFS. Os resultados apresentados na figura 21 são relativos ao mesmo cenário base considerado na FFS, ou seja, o despacho é baseado em FCFS, e os graus de *interchangeability* e de *performance efficiency* são de 100%.

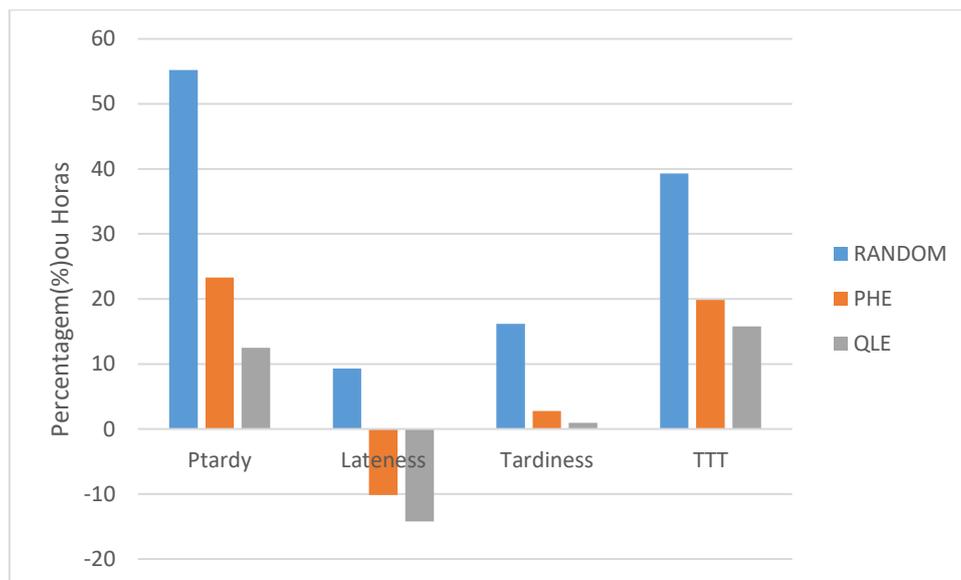


Figura 21 – Desempenho dos diversos métodos APC para o cenário base na GFFS

Na figura 21 encontram-se os resultados para as diversas medidas de desempenho delineadas na seção 3.3 para o cenário base acima referido. De uma forma geral o método QLE apresenta o melhor desempenho para todas as medidas de desempenho. Este consegue alcançar uma percentagem de atrasos de 12.49%, sendo esta percentagem de 23.31% no método das PHE e de 55.2% no método RANDOM. Pode-se, portanto, concluir que a configuração não influencia o desempenho relativo dos métodos, já que as restantes medidas de desempenho têm o mesmo comportamento (e.g, TTT – 39,31 horas (RANDOM); 19,84 horas (PHE) e 15,79 horas (QLE)).

4.2.1. Impacto da Regra de Despacho

Para avaliar o efeito das diversas regras de despacho consideradas no desempenho dos métodos APC utilizou-se o cenário base. Os resultados encontram-se na figura 22. O desempenho relativo dos métodos em todos os outros cenários apresenta um comportamento idêntico, pelo que não são aqui apresentados. Os resultados encontram-se no anexo IX.

Tal como acontece na FFS, a regra de despacho S/RTT+SPT apresenta os melhores resultados para a percentagem dos trabalhos em atrasos. Enquanto que a regra SPT é que obtém o melhor desempenho no tempo total de percurso. Este comportamento é refletido para todos os métodos APC como é observável na figura 22-(a) (RANDOM), 22-(b) (PHE) e 22-(c) (QLE). Da análise desta figura, vemos que o método QLE apresenta uma percentagem de trabalhos em atraso de 3,13% quando é usada a regra SPT, enquanto que quando é usada a regra S/RTT+SPT esta diminuiu para 2,76%. No método PHE, a

percentagem de trabalhos em atraso é de 7,36% quando a regra SPT é usada e é de 6,29% quando é usada a regra S/RTT+SPT.

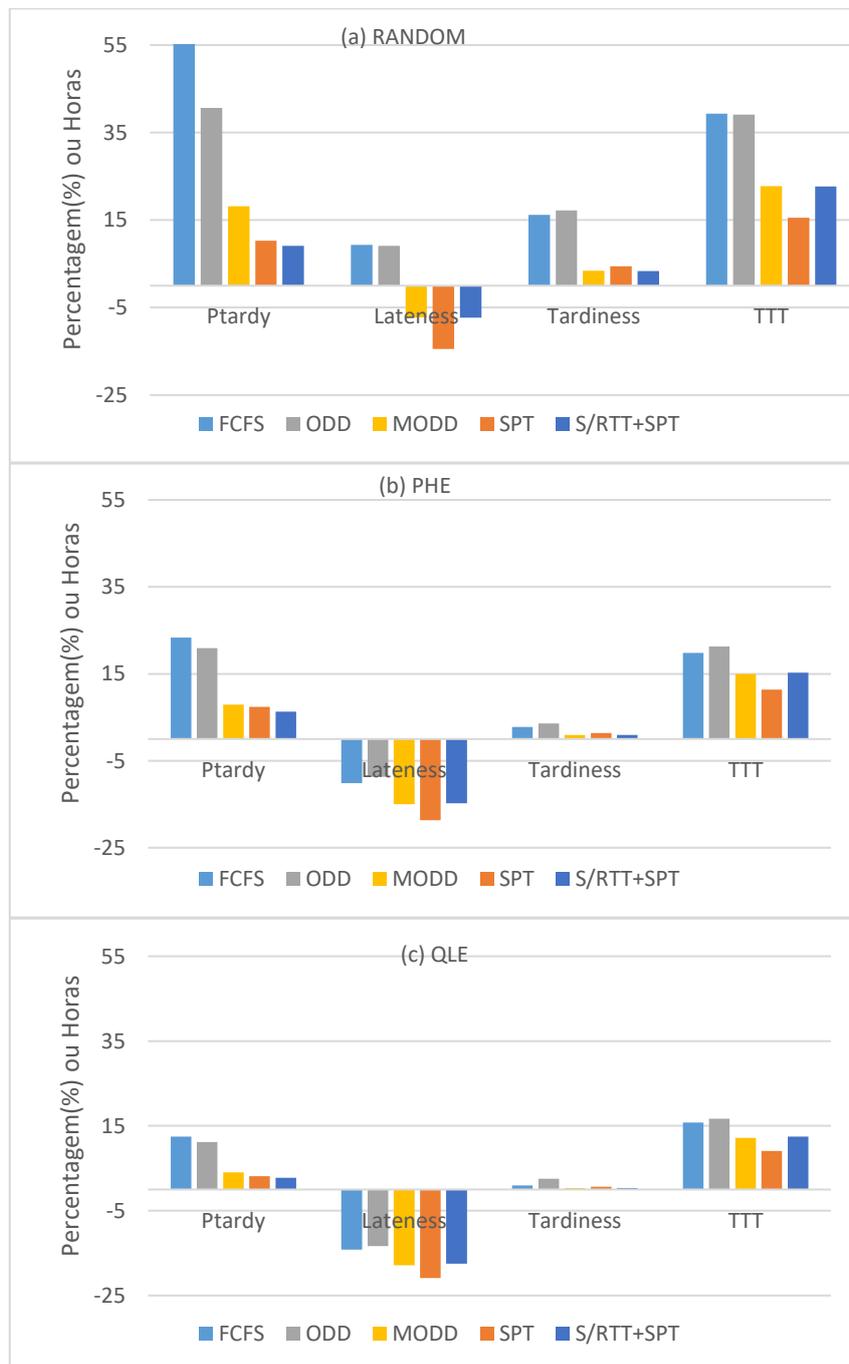


Figura 22 - Impacto da regra de despacho no desempenho dos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE, na GFFS

Conclui-se, portanto, que num ambiente mais complexo em termos de rotas, como é a GFFS, o desempenho relativo das regras de despacho mantem-se inalterado, tal como o desempenho relativo dos métodos sob influência das regras de despacho.

4.2.2. Impacto da *Performance Efficiency*

Para análise do impacto do grau de *performance efficiency* no desempenho dos métodos, utilizou-se o cenário, onde a regra de despacho é o FCFS e o grau de *interchangeability* é de 100%. O desempenho dos métodos sob influência das restantes regras de despacho e níveis de *interchangeability* é idêntico ao abaixo descrito. Os resultados encontram-se no anexo IX.

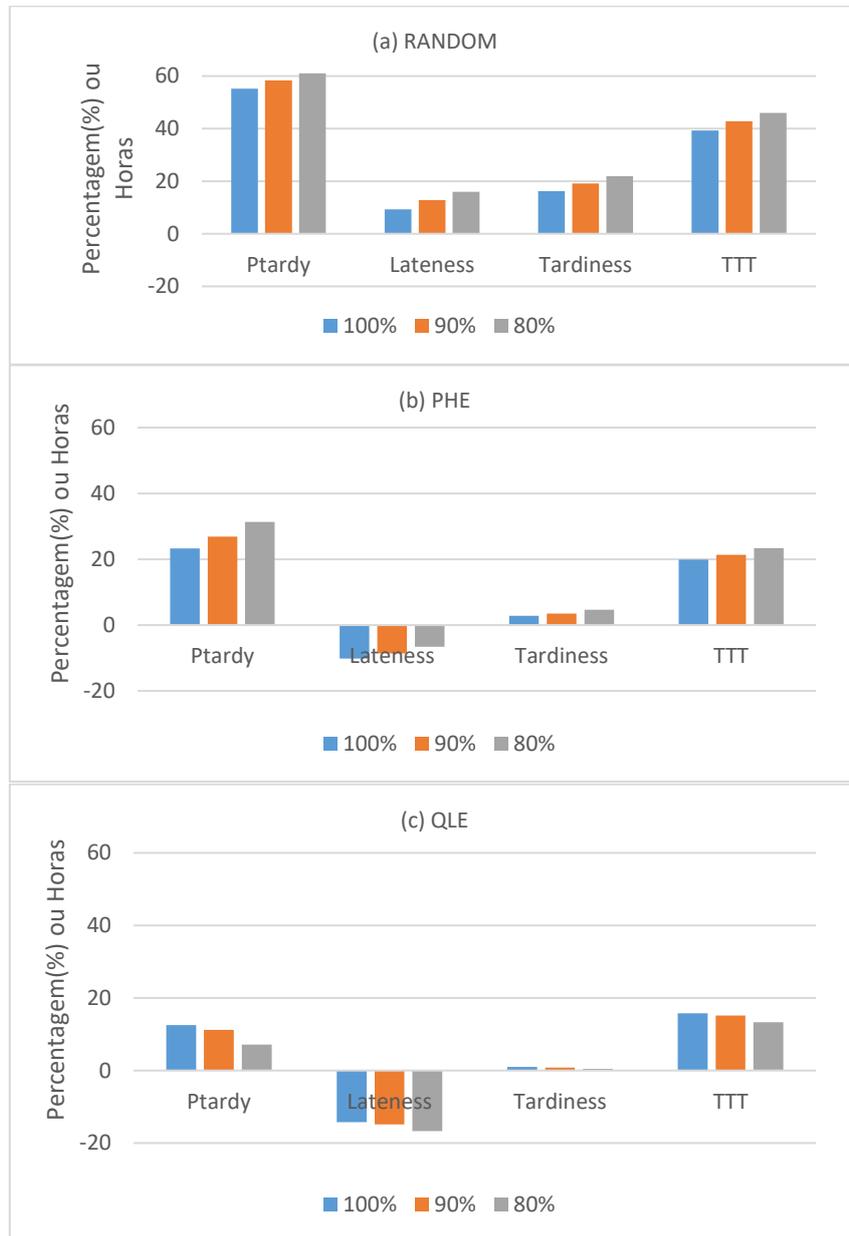


Figura 23 - Impacto da *Performance Efficiency* nos métodos APC: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS

Como se pode observar na figura 23, o desempenho dos métodos RANDOM (figura 23-a), PHE (figura 23-b) e QLE (figura 23-c) sob influência do grau de *performance efficiency* é similar ao do ambiente FFS, ou seja, diminuindo a *performance efficiency* tem um impacto negativo nos métodos RANDOM e PHE e um impacto positivo no método QLE. As razões são as apontadas na seção 4.1.2, para FFS. Para a

completar a justificação apresentada na seção 4.1.2 a figura 24 apresenta o gráfico dos valores de utilização média das 18 máquinas para cada nível de *performance efficiency*.

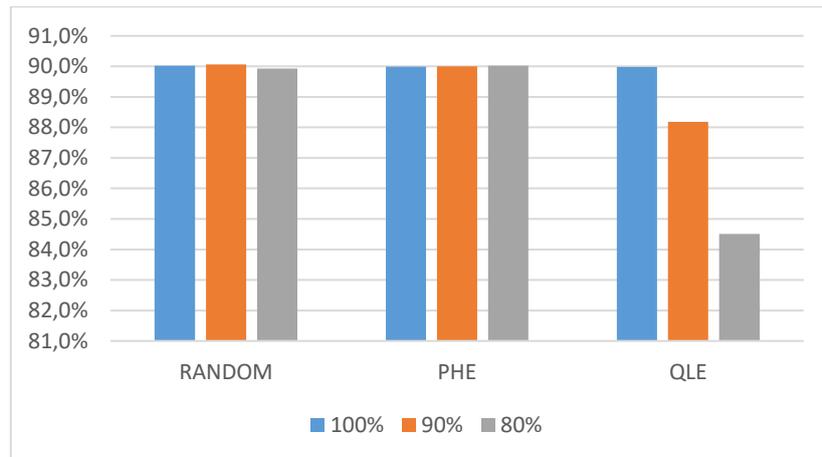


Figura 24 - Impacto do nível de efficiency na utilização das máquinas no cenário base na GFFS

As diferenças entre o nível de *performance efficiency* de 100% e de 80%, resultam numa deterioração de 6 pontos percentuais no método RANDOM e de 8 pontos percentuais no método PHE. No que toca ao método QLE, este melhora em cerca de 5 pontos percentuais relativamente ao nível de *performance efficiency* de 100%. No que se refere ao TTT, no método RANDOM aumenta em cerca de 6 horas, quando a quando a *performance efficiency* passa de 100% para 80%, enquanto que o método PHE aumenta em cerca de 3,5 horas de percurso. O QLE consegue melhora o TTT em 2,6 horas.

4.2.3. Impacto do grau *Interchangeability*

O impacto do grau de *interchangeability* é aqui apresentado nos mesmos dois cenários considerados na FFS. O primeiro tem por base a *performance efficiency* de 100%, enquanto que o segundo tem por base uma *performance efficiency* de 80%. Os resultados para os restantes cenários apresentam-se no anexo IX.

Na observação da figura 25 podemos constar 2 tipos de comportamento, o do método RANDOM (figura 25-a), cujo desempenho não se altera com o grau de *interchangeability* e o comportamento dos métodos PHE (figura 25-b) e QLE (figura 25-c), cujo o desempenho se deteriora para níveis mais baixos de *interchangeability*. Este comportamento é idêntico ao previamente observado para a FFS, sendo justificado pelas razões apontadas na seção 4.1.3.

Como se pode observar na figura 25 o QLE obtém uma percentagem de trabalhos em atraso de 12,5% se o grau de *interchangeability* for 100%, contudo, se o grau de *interchangeability* for reduzido para 25%, a percentagem de trabalhos em atraso sobe para os 23,6%. No caso do método PHE obtemos uma

percentagem de atraso de 23%, no caso de um grau de *interchangeability* de 100%, enquanto que para um grau de *interchangeability* de 25%, resulta uma percentagem de trabalhos em atraso de 32,6%. As restantes medidas de desempenho seguem um comportamento idêntico, tendendo a aumentar com a redução do grau de *interchangeability*.

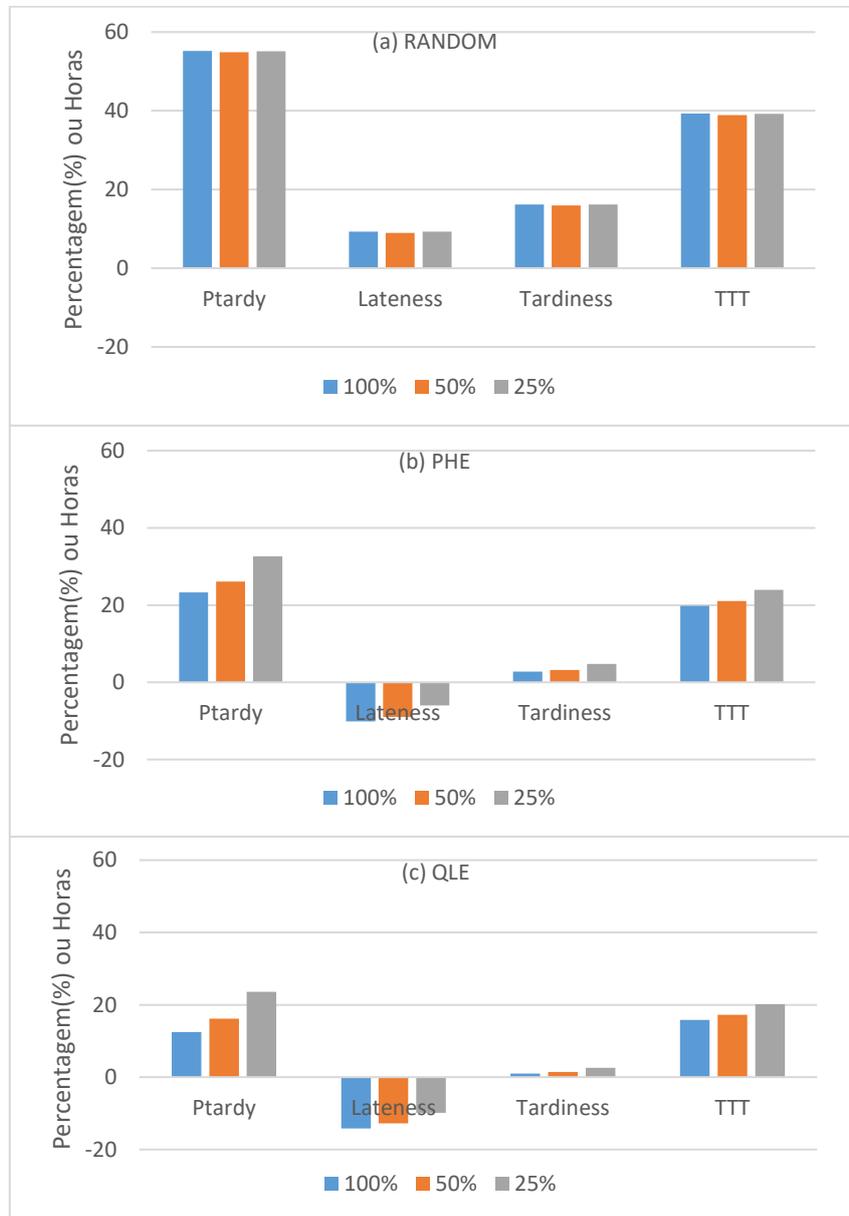


Figura 25 - Impacto do grau *interchangeability* para o cenário base nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS

Na análise do segundo cenário (figura 26) podemos observar que tal como acontece na FFS, na figura 26, existe uma ligeira melhoria de desempenho no método RANDOM (figura 26-a), com a diminuição da *interchangeability*, existe uma deterioração de desempenho no método QLE (figura 26-c) e uma ligeira melhoria no desempenho do método PHE (figura 26-b), para um valor intermédio de *interchangeability*, o qual pior para uma redução adicional da *interchangeability*. As razões são as mesmas que foram apontadas na seção 4.1.3 para a FFS.

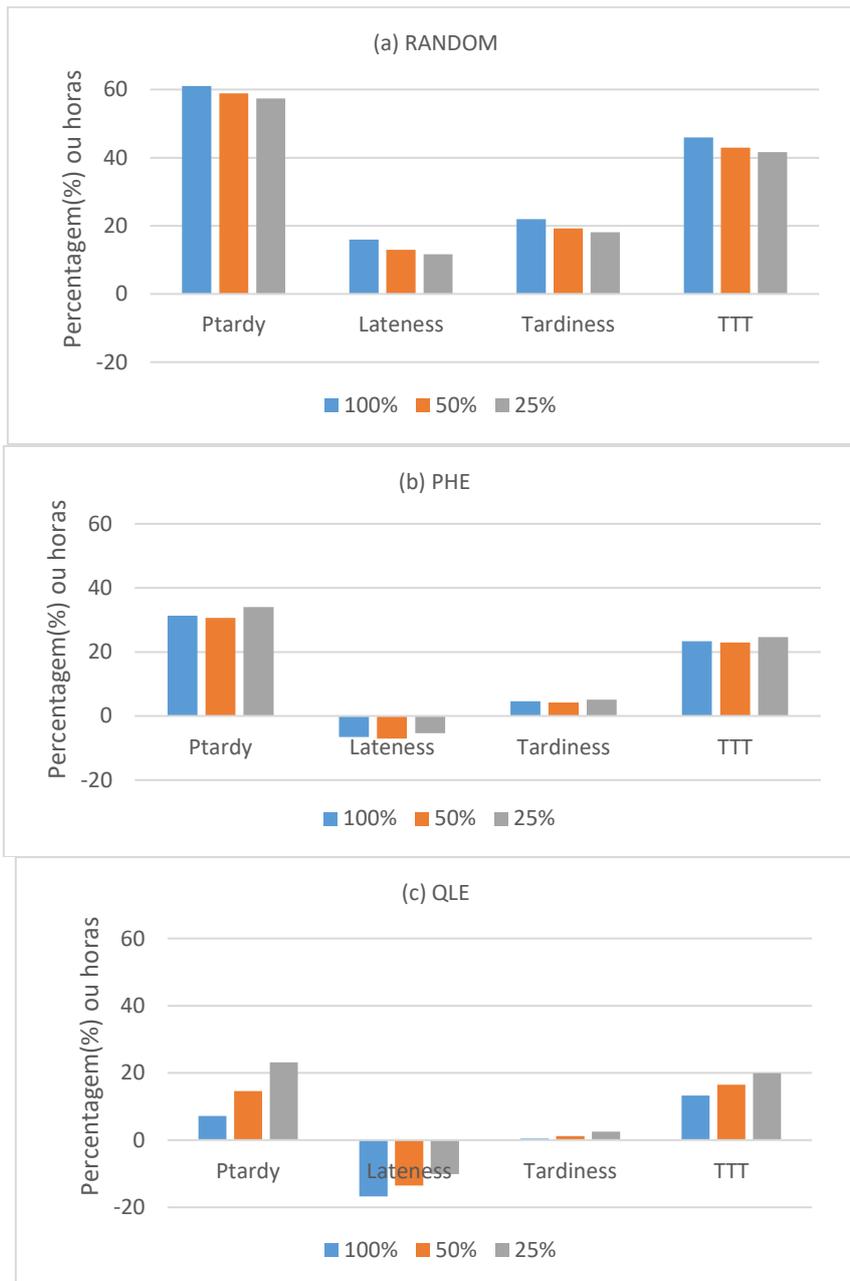


Figura 26 - Impacto do grau de interchangeability nos métodos: (a) RANDOM; (b) PHE; (c) QLE na GFFS para uma performance efficiency de 80%

4.2.4. Melhor cenário para cada método

De forma semelhante ao que aconteceu para a FFS apresentou-se agora o desempenho de cada um dos métodos no seu melhor cenário. A regra de despacho S/RTT+SPT apresentou o melhor desempenho em todos os cenários, independentemente do método usado. Assim, para a obtenção do melhor cenário no método RANDOM, esta regra de despacho foi conjugada com os graus de *interchangeability* e de

performance efficiency de 100%. Essa combinação permite obter uma percentagem de trabalhos em atraso de 9,1% e um tempo total de percurso de 22,66 horas, como se pode observar na figura 27.

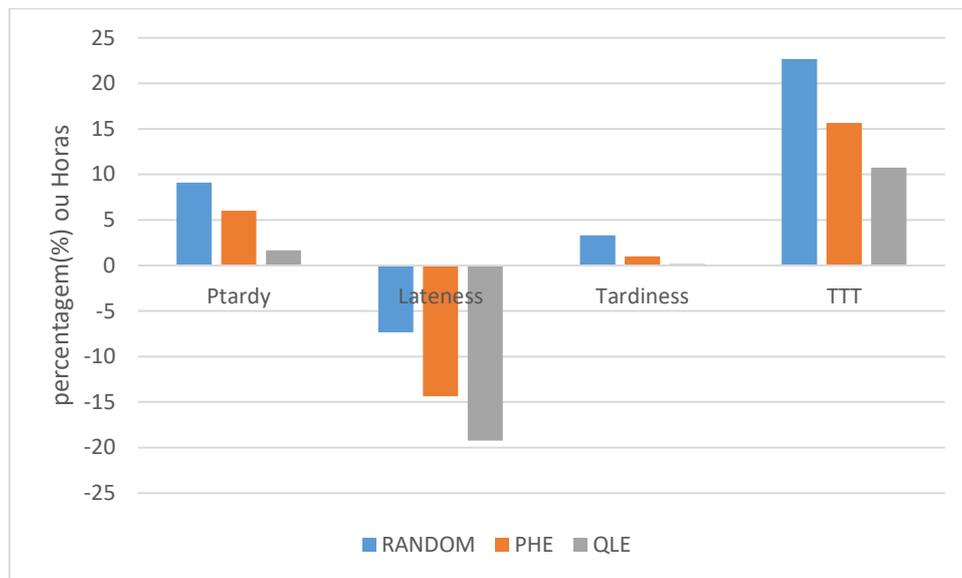


Figura 27 - Desempenho dos melhores cenários para cada método APC na GFFS

No método PHE o melhor cenário resulta da combinação da regra S/RTT+SPT com os graus de *interchangeability* de 50% e de *performance efficiency* de 100%. Neste cenário a percentagem de trabalhos atrasados é de 6%, o que corresponde a uma melhoria de 3 pontos percentuais em comparação com o método RANDOM. Se olharmos para a medida de desempenho TTT, conseguimos perceber que existiu uma diminuição de 7 horas, o que permite obter um tempo total de percurso de 15,64 horas.

No método QLE o melhor cenário resulta da combinação da regra de despacho S/RTT+SPT, como o grau de *interchangeability* de 100% e o grau de *performance efficiency* de 80%. Isto permite obter uma percentagem de trabalhos em atraso de 1,65%, sendo o método com melhor desempenho. A mesma conclusão é obtida para as outras medidas de desempenho (e.g., TTT de 10,76 horas)

Estes resultados mostram que o desempenho relativo dos métodos é independente da configuração produtiva testada.

5. EXTENSÃO DO PLANO EXPERIMENTAL

Nesta seção procede-se à extensão do plano experimental original, por forma a se avaliar o impacto das alterações propostas na revisão da literatura, no que concerne à tomada de decisão dos métodos APC levando em consideração o estado do sistema/máquina. Em particular, levando em consideração o tempo restante de processamento dos trabalhos nas máquinas, no momento da tomada de decisão, o qual pode ser influenciado pela ocorrência ou não de avarias.

Assim na seção 5.1 apresenta-se o método QLE refinado e na seção 5.2 procede-se à apresentação e análise dos resultados obtidos. O refinamento é feito apenas para o método QLE, uma vez que este mostrou desempenhar melhor na seção anterior.

5.1. Método QLE refinado

Por forma a levar em consideração o tempo restante de processamento dos trabalhos nas máquinas, no momento da tomada de decisão, procedeu-se à alteração da fórmula 1, referente ao método QLE, da seguinte forma:

$$QLE_m = PT_{mj} + \sum_{j \in Q_m} QL_{mk} + \max(0; TFinish_{mj} - TimeNow) \quad (24)$$

Nesta fórmula é introduzida a componente $\max(0; TFinish_{mj} - TimeNow)$ que é obtida pelo máximo entre o valor zero e a diferença entre o tempo estimado, no momento da tomada de decisão, para o fim de processamento do trabalho j na máquina m , $TFinish_{mj}$, e o tempo atual registado, $TimeNow$. Nas fórmulas seguintes, 25, 26 e 27 a variável $TStart_{mj}$ corresponde ao tempo registado do início de processamento do trabalho j na máquina m . $TFinish_{mj}$ é obtido pela fórmula 25, no caso de não ter existido até ao momento da tomada de decisão qualquer interrupção no processamento do trabalho j na máquina m por avaria. Caso contrário duas situações podem surgir: (1) a máquina ainda se encontra em reparação no momento da tomada de decisão (fórmula 26); ou (2) a máquina já se encontra reparada (fórmula 27). No primeiro caso é usada a fórmula 24 na qual é adicionada a componente MTTR relativa ao tempo esperado de reparação de máquina. No segundo caso é usada a fórmula 25, onde $MTTR$ é substituído pelo tempo real da avaria, T_Avaria_m .

$$TFinish_{mj} \begin{cases} TStart_{mj} + PT_{mj} & (25) \\ TFinish_{mj} = TStart_{mj} + PT_{mj} + MTTR & (26) \\ TFinish_{mj} = TStart_{mj} + PT_{mj} + T_Avaria_m & (27) \end{cases}$$

5.2. Resultados e Análise

As experiências para analisar o desempenho do método QLE refinado foram realizadas para as duas configurações, FFS e GFFS, usando a regra de despacho S/PRT+SPT que melhor resultados apresentou no capítulo 4 para todos os níveis dos fatores *performance efficiency* e *machine interchangeability*. As Tabelas 5 e 6 apresentam as melhorias obtidas em valor absoluto pelo método QLE refinado, para a FFS e GFFS, respetivamente.

Tabela 5 – Melhoria absoluta do método QLE refinado relativamente ao tradicional QLE na FFS

QLE					
Interchangeability	Efficiency	Ptardy (%)	Lateness (Horas)	Tardiness (Horas)	TTT (Horas)
100%	100%	0,31	2,54	0,07	2,54
100%	90%	0,24	2,05	0,04	2,04
100%	80%	0,27	2,59	0,06	2,58
50%	100%	0,24	1,52	0,05	1,52
50%	90%	0,24	1,35	0,04	1,34
50%	80%	0,31	1,70	0,08	1,70
25%	100%	0,26	0,99	0,08	0,98
25%	90%	0,19	0,70	0,01	0,69
25%	80%	0,27	1,07	0,08	1,07

Pelo que se pode observar pela tabela 5, relativa à FFS; o método QLE refinado, desempenha melhor que o método original para a percentagem de trabalhos em atraso, TTT e *tardiness*. Estas melhorias de desempenho são justificadas pela informação adicional que é disponibilizada ao método (relativa ao tempo restante de processamento) no momento da tomada de decisão.

Tal como acontece na FFS, na GFFS, o desempenho do método QLE refinado também é superior ao do método QLE original, contudo as diferenças de desempenho são menos expressivas. Isto deve-se ao facto de o número médio de operações na GFFS ser inferior ao número de operações na FFS, o que resulta em menos situações de tomada de decisão.

Tabela 6 - Melhoria absoluta do método QLE refinado relativamente ao tradicional QLE na GFFS

QLE					
Interchangeability	Efficiency	Ptardy (%)	Lateness (Horas)	Tardiness (Horas)	TTT (Horas)
100%	100%	0,17	0,14	0,03	0,14
100%	90%	0,15	0,24	0,02	0,25
100%	80%	0,01	0,05	0,00	0,05
50%	100%	0,37	0,50	0,07	0,50
50%	90%	0,27	0,44	0,05	0,44
50%	80%	0,34	0,60	0,05	0,59
25%	100%	0,79	0,98	0,15	0,98
25%	90%	0,64	0,84	0,11	0,85
25%	80%	0,63	0,73	0,09	0,73

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

As empresas necessitam de encontrar soluções para um desenvolvimento sustentável e economicamente viável num mercado cada vez mais complexo e exigente. O controlo autónomo da produção (APC - *Autonomous Production Control*) representa uma importante alternativa neste âmbito visando melhorar o desempenho dos sistemas de produção pela reação rápida e flexível às mudanças ou alterações que possam ocorrer nos sistemas de produção.

Assim, neste trabalho procede-se à avaliação do desempenho de dois métodos APC, uma de inspiração biológica, o método *Pheromone* (PHE) e outro racional, o método *Queue Length Estimator* (QLE). O desempenho destes métodos é comparado com um método de decisão puramente aleatório, que é usado para efeito de benchmarking. É ainda proposta uma nova regra de despacho por adaptação de uma regra existente. O estudo é realizado para diferentes cenários produtivos, decorrentes de duas configurações, FFS (*Flexible Flow Shop*) e GFFS (*General Flexible Flow Shop*), cinco regras de despacho, três graus de *interchangeability* e três níveis de *performance efficiency*

Os resultados obtidos, mostram que a regra de despacho proposta desempenha melhor que as restantes, e que o método QLE é superior ao método PHE, em todos os cenários considerados para a percentagem de trabalhos em atraso, TTT (*Total Throughput Time*), *Lateness* e *Tardiness*.

No que concerne ao método QLE este foi refinado com introdução de uma nova variável de decisão, o tempo restante de processamento dos trabalhos nos recursos, o qual é influenciado pela ocorrência de eventuais avarias. O método, QLE refinado foi posteriormente testado e comparado com o método original, mostrando desempenhar melhor que este nos cenários considerados.

6.1. Implicações para a Prática Industrial

Para a implementação dos métodos APC na prática industrial é necessário a partilha e armazenamento de dados recolhidos em tempo real. Isto requer a introdução de *hardware* e/ou *software* nas máquinas e transportadores para que estes possa ter a capacidade de comunicar e armazenar dados com vista à tomada de decisão. No caso do QLE, o método que melhor desempenhou no estudo aqui realizado será necessário a seguir indicado.

Ao nível da Máquina:

- Ter capacidade de armazenamento e de obter informação atualizada sobre os trabalhos em fila de espera e respetivos tempos de processamento;
- Ter capacidade de obter informação atualizada sobre cada uma das avarias, duração estimada e duração real;
- Ter a capacidade de comunicar com os outros objetos logísticos, nomeadamente transportadores, informação sobre o seu estado (e.g., disponível, avariada) e o seu valor de QLE.
- Capacidade de escolher autonomamente o trabalho seguinte com base numa regra de despacho delineada.

Ao nível dos Transportador:

- Ter capacidade de armazenamento de dados relativa à rota a seguir no transporte do trabalho e às características do trabalho (tipo de trabalho, data devida de entrega, etc.).
- Ter capacidade de comunicar com as máquinas
- Ter capacidade em tomar decisões por forma a selecionar a máquina em que irá ser processado.

6.2. Propostas de Trabalho Futuro

Sendo a área do Controlo Autónomo da Produção relativamente recente, existem inúmeras vertentes ainda por explorar. Identificam-se a seguir algumas, as quais são aqui sugeridas para trabalho futuro.

- Alargar o estudo a outros métodos APC e a outros cenários produtivos – por exemplo, há métodos que foram identificados na revisão da literatura que não foram testados;
- Estudar o impacto que o refinamento introduzido no método QLE tem nos outros métodos APC;
- Introduzir novas variáveis de decisão (e.g., estimativa de quando a próxima irá ocorrer) por forma a melhorar continuamente os métodos APC.
- Proceder à implementação prática de alguns dos métodos APC;
- Obter *insights* da implementação prática dos métodos em ambiente industrial.

7. BIBLIOGRAFIA

- Awate, P. G., & Saraph, P. V. (1997). An extension of modified-operational-due-date priority rule incorporating job waiting times and application to assembly job shop. *Sadhana*, 22(1), 83–100. <https://doi.org/10.1007/BF02744128>
- Böse, F., & Windt, K. (2007). Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics* (pp. 57–72). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47450-0_5
- Brah, S. A. (1996). A comparative analysis of due date based job sequencing rules in a flow shop with multiple processors. *Production Planning and Control*, 7(4), 362–373. <https://doi.org/10.1080/09537289608930364>
- Cicirello, V. A., & Smith, S. F. (2001a). Ant colony control for autonomous decentralized shop floor routing. *Proceedings - 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, ISADS 2001*. <https://doi.org/10.1109/ISADS.2001.917443>
- Cicirello, V. A., & Smith, S. F. (2001b). Ant colony control for autonomous decentralized shop floor routing. In *Proceedings 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems* (pp. 383–390). IEEE Comput. Soc. <https://doi.org/10.1109/ISADS.2001.917443>
- Durach, C. F., Kembro, J., & Wieland, A. (2017). A New Paradigm for Systematic Literature Reviews in Supply Chain Management. *Journal of Supply Chain Management*, 53(4), 67–85. <https://doi.org/10.1111/jscm.12145>
- Fernandes, N. O., Martins, T., & Carmo-silva, S. (2018). Improving materials flow through autonomous production control. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1015(May), 1–9. <https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1479895>
- Grundstein, S., Schukraft, S., Scholz-Reiter, B., & Freitag, M. (2015). Coupling order release methods with autonomous control methods – an assessment of potentials by literature review and discrete event simulation. *International Journal of Production Management and Engineering*, 3(1), 43. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2015.3199>
- Henrich, P., Land, M. J., & Gaalman, G. J. C. (2007). Production Planning & Control : The Management of Semi-interchangeable machines : implications for workload control, (December 2014), 37–41. <https://doi.org/10.1080/09537280600909445>
- Hornig, H. C., & Chou, S. H. (2002). Comparing dispatching rules in an open shop-a simulation study. *Submitted to IIE Annual Conference*.
- Hu, S. J. (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. *Procedia CIRP*, 7, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.002>
- Jagalski, T., Beer, C. De, & Freitag, M. (2007). Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times. *Proc. of 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, (July 2015).
- Jagalski, T., & Scholz-Reiter, B. (2008). Dynamics of Autonomous Control in Production Logistics . *Proceedings of the 2008 International Conference of the System Dynamics Society*.
- Khan, A., & Turowski, K. (2016). A Perspective on Industry 4.0: From Challenges to Opportunities in Production Systems. In *Proceedings of the International Conference on Internet of Things and Big Data* (pp. 441–448). <https://doi.org/10.5220/0005929704410448>
- Márkus, A., Kis Váncza, T., & Monostori, L. (1996). A Market Approach to Holonic Manufacturing. *CIRP Annals*, 45(1), 433–436. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63096-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63096-0)
- Mbrkus, A., Vbncza, K., Monostori, L., & Academy, H. (1996). A market approach to holonic manufacturing. *Analns of the CIRP*, 45(1), 433–436. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2007.016292>
- Niehues, M., Blum, M., Teschemacher, U., & Reinhart, G. (2017). Adaptive job shop control based on permanent order sequencing: Balancing between knowledge-based control and complete

- rescheduling. *Production Engineering*, 0(0), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s11740-017-0780-1>
- Pegden, C. D. (2007). Simio: A new simulation system based on intelligent objects. *2007 Winter Simulation Conference*, 2293–2300. <https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419867>
- Philipp, T., de Beer, C., Windt, K., & Scholz-Reiter, B. (2007). Evaluation of Autonomous Logistic Processes – Analysis of the Influence of Structural Complexity. In *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics* (pp. 303–324). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47450-0_20
- Renna, P. (2010). Job shop scheduling by pheromone approach in a dynamic environment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(5), 412–424. <https://doi.org/10.1080/09511921003642170>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2), 215824401665398. <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Schlingensiepen, J., Nemtanu, F., Mehmood, R., & McCluskey, L. (2016). Autonomic transport management systems—enabler for smart cities, personalized medicine, participation and industry grid/industry 4.0. *Studies in Systems, Decision and Control*. TH Ingolstadt, Ingolstadt, Germany: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19150-8_1
- Scholz-Reiter, B., Dashkowskij, S., Görges, M., Jagalski, T., & Naujok, L. (2012). Autonomous decision policies for networks of production systems. In *Decision Policies for Production Networks* (pp. 235–263). https://doi.org/10.1007/978-0-85729-644-3_10
- Scholz-Reiter, B., De Beer, C., Freitag, M., & Jagalski, T. (2008). Bio-inspired and pheromone-based shop-floor control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(2), 201–205. <https://doi.org/10.1080/09511920701607840>
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., Beer, C. de, & Jagalski, T. (2006). The Influence of Production Networks' Complexity on the Performance of Autonomous Control Methods. *Manufacturing Engineering*, 4–7.
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., & Jagalski, T. (2007). Analysing the Dynamics caused by Autonomously Controlled Logistic Objects. *Proceedings of 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007)*, (July 2015), 273–280.
- Scholz-Reiter, B., Görges, M., Jagalski, T., & Mehraei, A. (2009). Modelling and analysis of autonomously controlled production networks. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol. 13, pp. 846–851). <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0081>
- Scholz-Reiter, B., Görges, M., Jagalski, T., & Naujok, L. (2010). Modelling and analysis of an autonomous control method based on bacterial chemotaxis. *43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2010 (ICMS 2010)*, (2), 699–706.
- Scholz-Reiter, B., Görges, M., & Philipp, T. (2009). Autonomously controlled production systems-Influence of autonomous control level on logistic performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 395–398. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.011>
- Scholz-Reiter, B., Grges, M., & Jagalski, T. (2011). Modeling and analyzing integrated autonomously controlled production and transport processes. *21st International Conference on Production Research: Innovation in Product and Production, ICPR 2011 - Conference Proceedings*. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/blog/document.url?mid=cpx_M8c435c614c32ee2a18M6fd1017816338&database=cpx
- Scholz-Reiter, B., Jagalski, T., & Bendul, J. C. (2014). Autonomous Control of a Shop Floor Based on Bee's Foraging Behaviour. In *Dynamics in Logistics* (pp. 415–423). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-76862-3_41
- Scholz-Reiter, B., Karimi, H., Duffie, N., & Jagalski, T. (2011). Bio-inspired capacity control for production networks with autonomous work systems. *Proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, 5. Retrieved from

- http://msep.engr.wisc.edu/phocadownload/cirp44_bio-inspired_capacity_control.pdf
- Scholz-Reiter, B., Rekersbrink, H., & Görges, M. (2010). Dynamic flexible flow shop problems—Scheduling heuristics vs. autonomous control. *CIRP Annals*, *59*(1), 465–468. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.030>
- Schukraft, S., Grundstein, S., Scholz-Reiter, B., & Freitag, M. (2016). Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *29*(4), 438–461. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1066032>
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., & Scavarda, A. J. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, *27*(5), 408–420. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>
- Ueda, K., Hatono, I., Fujii, N., & Vaario, J. (2000). Reinforcement Learning Approaches to Biological Manufacturing Systems. *CIRP Annals*, *49*(1), 343–346. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62960-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62960-6)
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, *20*, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., & Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, *37*(3), 255–274. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00102-X)
- Wang, Y., Ma, H.-S., Yang, J.-H., & Wang, K.-S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, *5*(4), 311–320. <https://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7>
- Wenning, B., Rekersbrink, H., & Timm-giel, A. (2006). Autonomous control by means of distributed routing. *Communication*, 1–12.
- Wenning, B., Rekersbrink, H., Timm-Giel, A., Görg, C., & Scholz-Reiter, B. (2006). Autonomous Control by Means of Distributed Routing. In *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics* (pp. 325–335). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47450-0_21
- Windt, K., Becker, T., Asenov, D., & Arbabzadah, F. (2010). A generic implementation approach of autonomous control methods in production logistics. In *2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2010* (pp. 629–633). <https://doi.org/10.1109/ICCA.2010.5524133>
- Windt, K., Becker, T., Jeken, O., & Gelessus, A. (2010). A classification pattern for autonomous control methods in logistics. *Logistics Research*, *2*(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s12159-010-0030-9>
- Windt, K., Becker, T., Jeken, O., & Gelessus, A. (2010). A classification pattern for autonomous control methods in logistics. *Logistics Research*, *2*(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s12159-010-0030-9>
- Wong, D. (2018). VOSviewer. *Technical Services Quarterly*, *35*(2), 219–220. <https://doi.org/10.1080/07317131.2018.1425352>

ANEXO I - Amostra dos documentos selecionados para a revisão da literatura

Autores	Ano	Título do Documento	Jornal/Livro
K. Windt; T. Becker; O. Jeken; A. Gelessus.	2010	A classification pattern for autonomous control methods in logistics	Logistics Research
B. Scholz-Reiter; D. Rippel; S. Sowade.	2011	A Concept for Simulation of Autonomous Logistic Processes	International Journal of Systems Applications, Engineering & Development
J.S. Yoon; S.J. Shin; S.H. Suh.	2012	A conceptual framework for the ubiquitous factory	International Journal of Production Research
A. Mehraei; K. Thoben; H.R. Karimi.	2013	A fuzzy programming method for optimization of autonomous logistics objects	2013 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)
K. Windt; T. Becker; D. Asenov; F. Arbabzadah.	2010	A generic implementation approach of autonomous control methods in production logistics	2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2010
A. Márkus; T. Kis Váncza; L. Monostori.	1996	A Market Approach to Holonic Manufacturing	CIRP Annals
S.Grundstein; M. Freitag; B. Scholz-Reiter.	2017	A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates	Journal of Manufacturing Systems
U. Teschemacher; S. Vernim; M. Gröger; I. Hellig; P. Siggelkow; F. Sipp; T. Tausendpfund; G. Reinhart.		Acceptance of autonomous production planning and control systems: Company survey on the prevalence and acceptance of autonomous control systems	ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
P. Leitão; J. Barata.	2007	An agent-based disturbance handling architecture in manufacturing control	IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)
S. Grundstein; S. Schukraft; M. Görges; B. Scholz-Reiter.	2013	An approach for applying autonomous production control methods with central production planning	International Journal of Systems Applications, Engineering & Development
H. Rekersbrink; B. Scholz-Reiter; C. Zabel.	2010	An autonomous control concept for production logistics	Lecture Notes in Business Information Processing
B. Scholz-Reiter; M. Freitag; C. De Beer; T. Jagalski.	2007	Analysing the Dynamics caused by Autonomously Controlled Logistic Objects	Proceedings of 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007)
L. Mekaouche; F. Ounnar; P. Pujo; N. Giambiasi.	2009	Another way to manage supply chains: holonic and multicriteria approach	International Journal of Logistics Systems and Management
V. Cicirello; S. Smith.	2001	Ant colony control for autonomous decentralized shop floor routing	Proceedings 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems
K. Windt; T. Philipp; F. Böse; T. Becker.	2010	Application of a three-component evaluation system for autonomous control in logistics	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture

A. Mehrsai; H.R. Karimi; K.D. Thoben; B. Scholz-Reiter.	2013	Application of learning pallets for real-time scheduling by the use of radial basis function network	Neurocomputing
S. Dashkovskiy; A. Mironchenko; L. Naujok.	2011	Autonomous and Central Control of Production Networks	Autonomous Cooperation and Control in Logistics
B. Wenning; H. Rekersbrink; A. Timm-Giel; C. Görg; B. Scholz-Reiter.	2006	Autonomous Control by Means of Distributed Routing	Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics
F. Harjes; B. Scholz-Reiter;	2012	Autonomous control in event logistics	11th International Conference on Modeling and Applied Simulation, MAS 2012, Held at the International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference, I3M 2012
K. Windt; O. Jeken; T. Becker.	2010	Autonomous control in production	ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb
S. Dashkovskiy; M. Görges; L. Naujok.	2012	Autonomous control methods in logistics - A mathematical perspective	Applied Mathematical Modelling
B. Scholz-Reiter; T. Jagalski; J.C. Bendul.	2014	Autonomous Control of a Shop Floor Based on Bee's Foraging Behaviour	Dynamics in Logistics
D. Armbruster; C. de Beer; M. Freitag; T. Jagalski; C. Ringhofer.	2006	Autonomous control of production networks using a pheromone approach	Physica A: Statistical Mechanics and its Applications
B. Scholz-Reiter; S. Dashkovskiy; M. Görges; T. Jagalski; L. Naujok.	2012	Autonomous decision policies for networks of production systems Journal of Manufacturing Systems	Decision Policies for Production Networks
T. Jagalski; C. de Beer; M. Freitag.	2007	Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times	Proc. of 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems
B. Scholz-Reiter; M. Görges; T. Philipp;	2009	Autonomously controlled production systems-Influence of autonomous control level on logistic <i>performance</i>	CIRP Annals - Manufacturing Technology
K. Windt; F. Böse; T. Philipp;	2008	Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application	Robotics and Computer-Integrated Manufacturing
B. Scholz-Reiter; C. De Beer; M. Freitag; T. Jagalski.	2008	Bio-inspired and pheromone-based shop-floor control	International Journal of Computer Integrated Manufacturing
B. Scholz-Reiter; H.R. Karimi; N.A. Duffie; T. Jagalski.	2011	Bio-inspired capacity control for production networks with autonomous work systems	Proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems
A. Mehrsai; K. Thoben; B. Scholz-Reiter.	2014	Bridging lean to agile production logistics using autonomous carriers in pull flow	International Journal of Production Research
F. Böse; K. Windt	2007	Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics	Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics
K. Windt; T. Philipp; F. Böse.	2008	Complexity cube for the characterization of complex production systems	International Journal of Computer Integrated Manufacturing

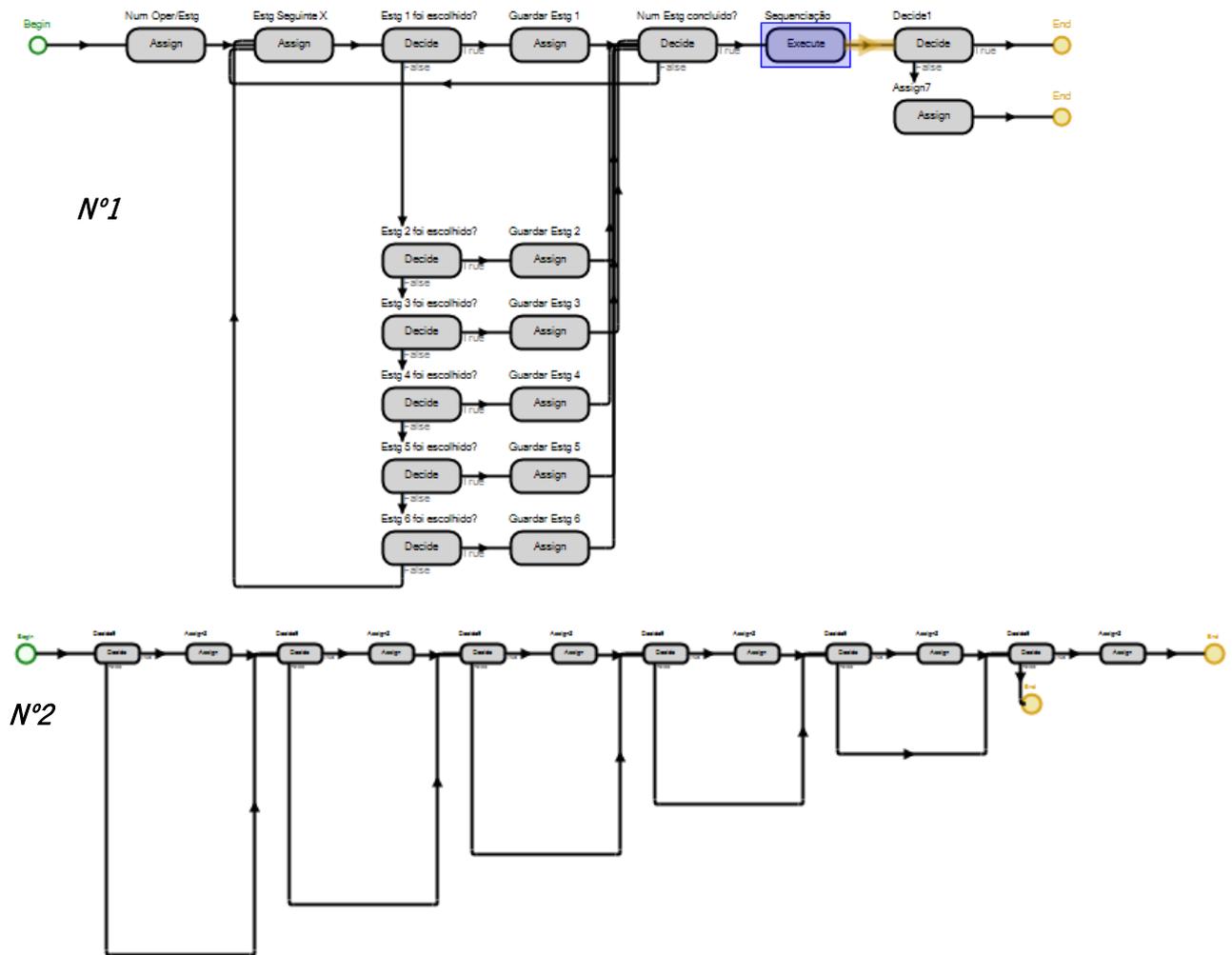
R. Muller; M. Vette; L. Horauf; C. Speicher; K. Jatti.	2016	Concept and implementation of an agent-based control architecture for a cyber-physical assembly system	MATEC Web of Conferences
S. Grundstein; S. Schukraft; B. Scholz-Reiter; M. Freitag.	2015	Coupling order release methods with autonomous control methods – an assessment of potentials by literature review and discrete event simulation	International Journal of Production Management and Engineering
P. Nyen; E. Polanscak; O. Roulet-Dubonnet; M. Lind.	2016	Distributed, Autonomous Control in Production of Jet Turbine Parts	Procedia CIRP
J. Heger; J. Branke; T. Hildebrandt; B. Scholz-Reiter.	2016	Dynamic adjustment of dispatching rule parameters in flow shops with sequence-dependent set-up times	International Journal of Production Research
B. Scholz-Reiter; H. Rekersbrink; M. Görges.	2010	Dynamic flexible flow shop problems—Scheduling heuristics vs. autonomous control	CIRP Annals
T. Jagalski; B. Scholz-Reiter.	2008	Dynamics of Autonomous Control in Production Logistics	Proceedings of the 2008 International Conference of the System Dynamics Society
B. Scholz-Reiter; M. Görges.	2011	Dynamics of direct transports in autonomously controlled production networks	10th International Conference on Modeling and Applied Simulation, MAS 2011, Held at the International Mediterranean and Latin American Modeling Multiconference, I3M 2011
B. Scholz-Reiter; J. Kolditz; T. Hildebrandt.	2009	Engineering autonomously controlled logistic systems	International Journal of Production Research
S. Schukraft; S. Grundstein; B. Scholz-Reiter; M. Freitag.	2016	Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control	International Journal of Computer Integrated Manufacturing
T. Philipp; C. De Beer; K. Windt; B. Scholz-Reiter.	2007	Evaluation of Autonomous Logistic Processes — Analysis of the Influence of Structural Complexity	Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics
S. Grundstein; S. Schukraft; B. Scholz-Reiter; M. Freitag.	2015	Evaluation System for Autonomous Control Methods in Coupled Planning and Control Systems	Procedia CIRP
N. Gebhardt; O. Jeken; K. Windt.	2011	Exploitations of Manufacturing Flexibilities in Decision Methods for Autonomous Control of Production Processes	Autonomous cooperation and control in logistics : contributions and limitations; theoretical and practical perspectives
N. Broue; M. Weck.	1998	Feature-oriented programming interface for an autonomous production cell	Control Engineering Practice
N.O. Fernandes; T. Martins; S. Carmo-Silva.	2018	Improving materials flow through autonomous production control	Journal of Industrial and Production Engineering
P. Renna	2010	Job shop scheduling by pheromone approach in a dynamic environment	International Journal of Computer Integrated Manufacturing
B. Scholz-Reiter; D. Rippel; S. Sowade.	2011	Limitations in modeling autonomous logistic processes: Challenges and solutions in business process modeling	Proceedings - 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, ISAM 2011

B. Scholz-Reiter; M. Gorges; T. Jagalski.	2011	Modeling and analyzing integrated autonomously controlled production and transport processes	21st International Conference on Production Research: Innovation in Product and Production, ICPR 2011 - Conference Proceedings
B. Scholz-Reiter; D. Rippel; S. Sowade.	2010	Modeling and simulation of autonomous logistic processes	European Conference of Chemical Engineering, ECCE'10, European Conference of Civil Engineering, ECCIE'10, European Conference of Mechanical Engineering, ECME'10, European Conference of Control, ECC'10
C. Berger; U. Hoffmann; S. Braunreuther; G. Reinhart.	2018	Modeling, simulation, and control of production resource with a control theoretic approach	Procedia CIRP
B. Scholz-Reiter; M. Görge; T. Jagalski; L. Naujok.	2010	Modelling and analysis of an autonomous control method based on bacterial chemotaxis	43rd CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2010 (ICMS 2010)
B. Scholz-Reiter; M. Freitag; C. De Beer; T. Jagalski.	2005	Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control	Proc. of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems.
B. Scholz-Reiter; M. Görge; T. Jagalski; A. Mehrsai.	2009	Modelling and Analysis of Autonomously Controlled Production Networks	IFAC Proceedings Volumes
B. Scholz-Reiter; T. Jagalski.	2008	Modelling Autonomous Control in Production Logistics	7th International Heinz Nixdorf Symposium Self-optimizing Mechatronic Systems
B. Scholz-Reiter; M. Freitag; C. De Beer; Th. Jagalski.	2005	Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches	CIRP Annals - Manufacturing Technology
P. Peeters; H. Van Brussel; P. Valckenaers; J. Wyns; L. Bongaerts; M. Kollingbaum; T. Heikkilä.	2001	Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops	Artificial Intelligence in Engineering
P. Pujo; N. Broissin; F. Ounnar.	2009	PROSIS: An isoarchic structure for HMS control	Engineering Applications of Artificial Intelligence
H. Brussel; J. Wyns; P. Valckenaers; L. Bongaerts; P. Peeters.	1998	Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA	Computers in Industry
K. Ueda; I. Hatono; N. Fujii; J. Vaario.	2000	Reinforcement Learning Approaches to Biological Manufacturing Systems	CIRP Annals
B. Scholz-Reiter; J. Kolditz; T. Hildebrandt.	2007	Specifying adaptive business processes within the production logistics domain-a new modelling concept and its challenges	Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics: The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow

B. Scholz-Reiter; S. Dashkovskiy; M. Görges; L. Naujok.	2011	Stability analysis of autonomously controlled production networks	International Journal of Production Research
S. Schukraft; S. Grundstein; M. Freitag; B. Scholz-Reiter	2015	Strategies for the Coupling of Autonomous Control and Central Planning: Evaluation of Strategies Using Logistic Objectives Achievement and Planning Adherence	2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics
T. Rühr; D. Pangercic; M. Beetz.	2008	Structured reactive controllers and transformational planning for manufacturing	IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA
B. Scholz-Reiter; A. Mehraei.	2010	Superior <i>Performance</i> of Leagile Supply Networks by Application of Autonomous Control	IFIP WG 5.7 International Conference on Advances in Production Management Systems: New Challenges, New Approaches, APMS 2009
S. Schafer; D. Schottke; T. Kampfe; U. Berger.	2013	Technical conditions for the use of autonomous systems: A general approach on an example	2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)
F. Ganji; M. Veigt; B. Scholz-Reiter.	2011	Technical possibilities for implementing autonomous control in production logistics	Productivity Management
C. F. Kwong; T. C. Chuah; S. W. Tan.	2014	The ANFIS handover trigger scheme: The Long Term Evolution (LTE) perspective	IEEE International Conference on Fuzzy Systems
B. Scholz-Reiter; M. Freitag; C. De Beer; T. Jagalski.	2006	The Influence of Production Networks ' Complexity on the <i>Performance</i> of Autonomous Control Methods	Manufacturing Engineering
A. Mehraei; H.R. Karimi; B. Scholz-Reiter.	2013	Toward learning autonomous pallets by using fuzzy rules, applied in a Conwip system	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
L. Torres; L. Schnitman; J. A.M.F. De Souza.	2018	Towards intelligent autonomous controllers: Architecture for industrial distributed system	Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA
D.T. Matt	2006	VALUE STREAM ORIENTED PLANNING OF SUPPLY NETWORKS	IFAC Proceedings Volumes

ANEXO II – Geração de Ordens para a configuração GFFS no SIMIO™

O processo a azul “sequenciação” está representado no fluxograma número 2 deste anexo



The screenshot shows a simulation environment with a 'Encomendas' (Orders) entity represented by a grey box with a play button icon. To its right is a configuration panel for this entity.

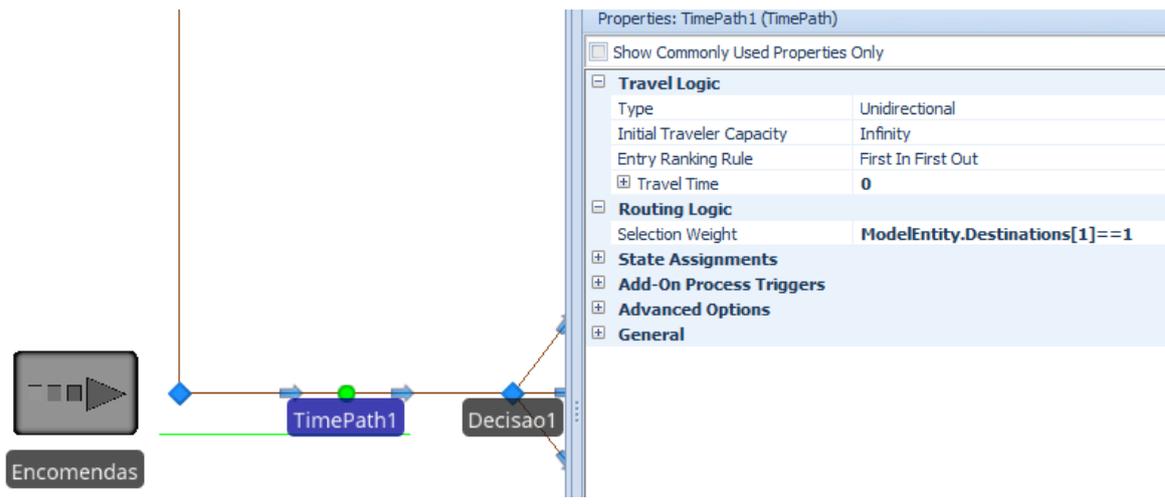
- Entity Arrival Logic**
 - Entity Type: **GeralProduct.Produtos**
 - Arrival Mode: Interarrival Time
 - Time Offset: 0,0
 - Interarrival Time: **InterarrivalTime_Source1**
 - Entities Per Arrival: 1
- Stopping Conditions**
- Buffer Logic**
- Table Row Referencing**
 - Before Creating Entities
 - Action Type: Reference Existing Row
 - Table Name: **GeralProduct**
 - Row Number: **GeralProduct.Mix.RandomRow**
 - On Created Entity
- State Assignments**
- Financials**
- Add-On Process Triggers**
 - Run Initialized
 - Run Ending
 - Creating Entities
 - Created Entity: **Criação**
 - Exited
- Advanced Options**
- General**
- Animation**

	Produtos	Mix	code
1	ProductA	33,33	1
2	ProductB	33,33	2
3	ProductC	33,33	3
*			

The screenshot shows a simulation flow diagram. A 'Connector1' (represented by a blue diamond) is connected to a 'Decisao1' (represented by a blue diamond). The flow starts from a source (green dot) and goes through the connector to the decision node. The 'Decisao1' node has three outgoing paths. To the right is a properties panel for 'Connector1'.

Properties: Connector1 (Connector)

- Show Commonly Used Properties Only
- Routing Logic**
 - Selection Weight: **ModelEntity.Destinations[1]==0**
- Advanced Options**
- General**



ANEXO III – Geração de Ordens para a configuração GFFS no SIMIO™

Entity Arrival Logic

Entity Type	↗ GeralProduct.Produtos
Arrival Mode	Interarrival Time
⊕ Time Offset	0.0
Interarrival Time	↗ InterarrivalTime_Source1
Entities Per Arrival	1

Stopping Conditions

Buffer Logic

Table Row Referencing

Before Creating Entities

Action Type	Reference Existing Row
Table Name	GeralProduct
Row Number	GeralProduct.Mix.RandomRow

On Created Entity

State Assignments

Financials

Add-On Process Triggers

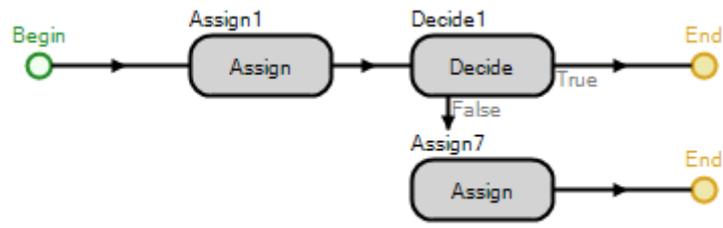
Run Initialized	
Run Ending	
Creating Entities	
Created Entity	Criação
Exited	

Advanced Options

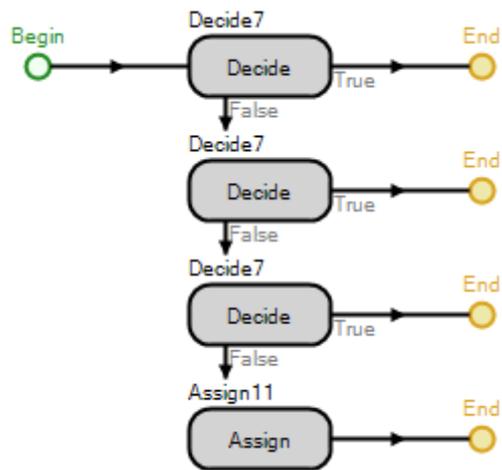
General

Animation

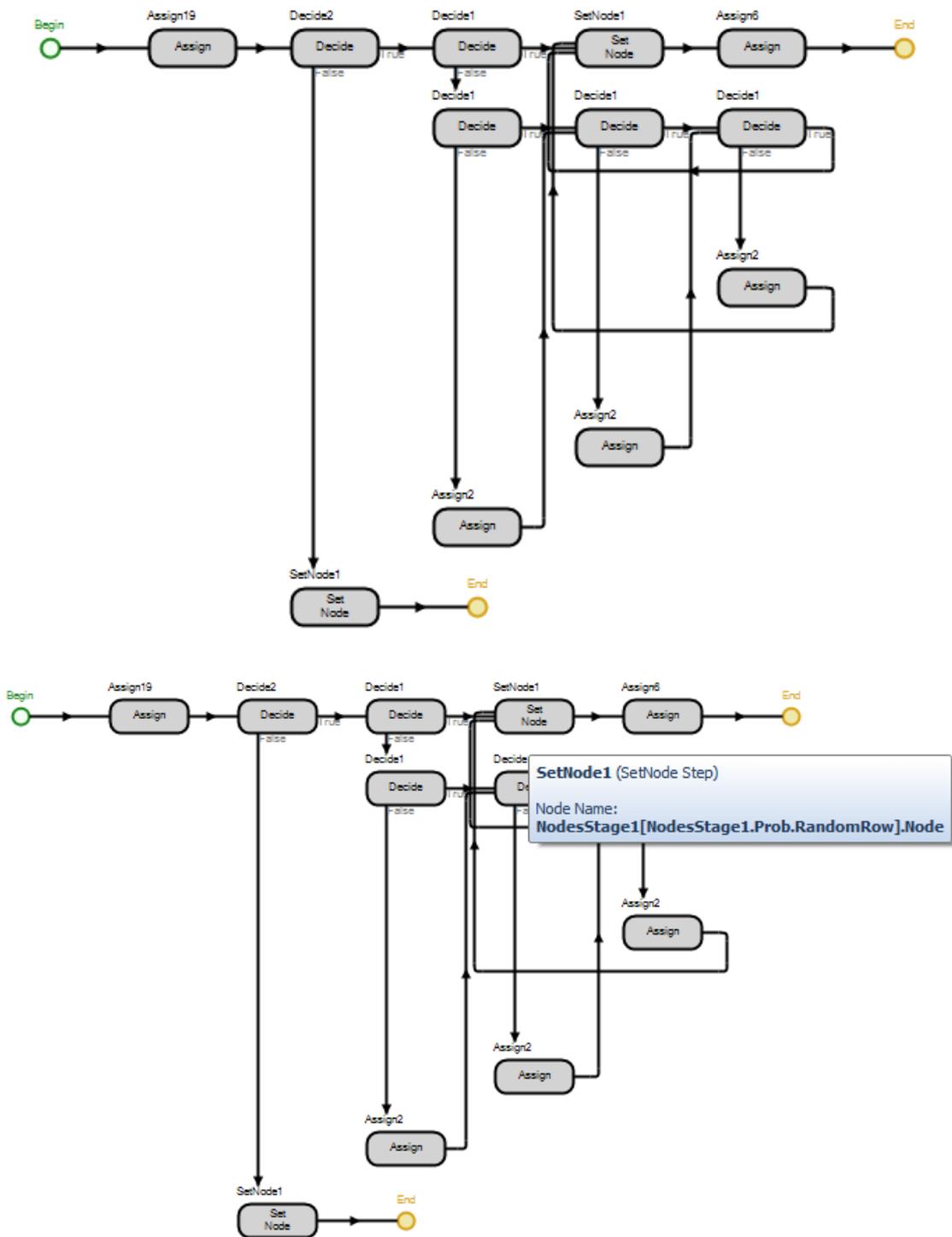
Geral Product			
	Produtos	Mix	code
1	ProductA	33,33	1
	Sequence Table		
	Table Reference 1	Sequence	
▶ 1	ProductA	Decision 1	
2	ProductA	Decision 2	
3	ProductA	Decision 3	
4	ProductA	Decision 4	
5	ProductA	Decision 5	
6	ProductA	Decision 6	
7	ProductA	Input@Cliente	
*			
2	ProductB	33,33	2
	Sequence Table		
	Table Reference 1	Sequence	
▶ 1	ProductB	Decision 1	
2	ProductB	Decision 2	
3	ProductB	Decision 3	
4	ProductB	Decision 4	
5	ProductB	Decision 5	
6	ProductB	Decision 6	
7	ProductB	Input@Cliente	
*			
▶ 3	ProductC	33,33	3
	Sequence Table		
	Table Reference 1	Sequence	
▶ 1	ProductC	Decision 1	
2	ProductC	Decision 2	
3	ProductC	Decision 3	
4	ProductC	Decision 4	
5	ProductC	Decision 5	
6	ProductC	Decision 6	
7	ProductC	Input@Cliente	
*			



ANEXO IV – Implementação do parâmetro de *Efficiency* no SIMIO™

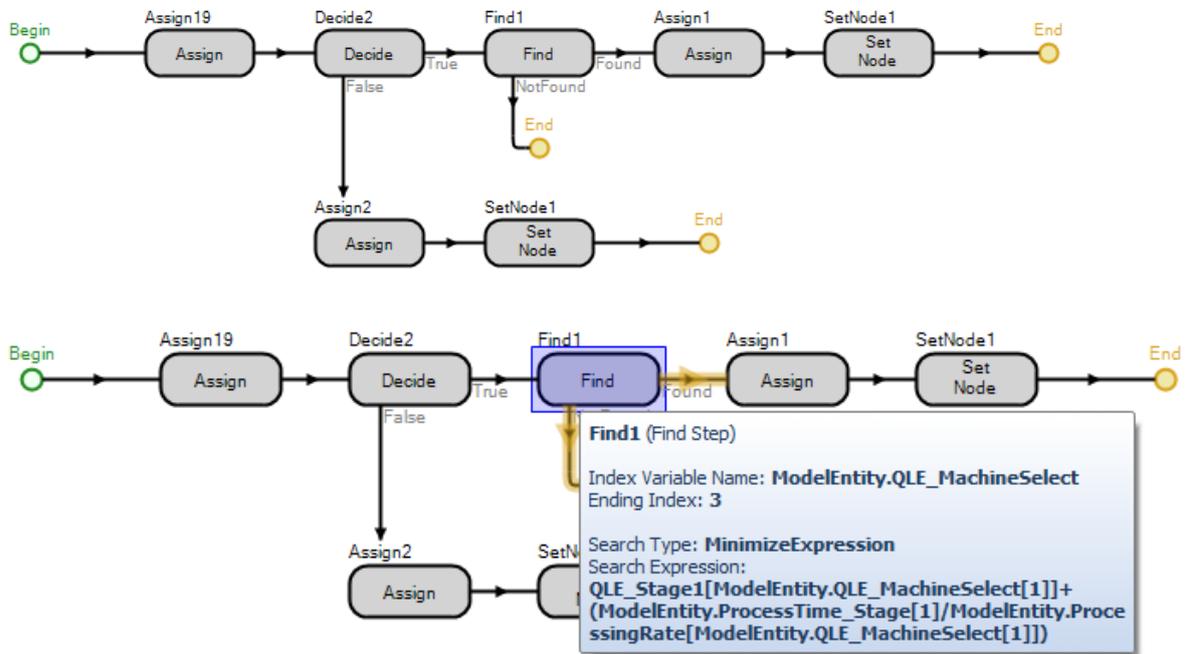


ANEXO V – Implementação do método PHE no SIMIO™



 PHE_Stage1	Real State Variable	PHE_Stage1
 PHE_Stage2	Real State Variable	PHE_Stage2
 PHE_Stage3	Real State Variable	PHE_Stage3
 PHE_Stage4	Real State Variable	PHE_Stage4
 PHE_Stage5	Real State Variable	PHE_Stage5
 PHE_Stage6	Real State Variable	PHE_Stage6
 Prob_PHE_Stage1	Real State Variable	Prob_PHE_Stage1
 Prob_PHE_Stage2	Real State Variable	Prob_PHE_Stage2
 Prob_PHE_Stage3	Real State Variable	Prob_PHE_Stage3
 Prob_PHE_Stage4	Real State Variable	Prob_PHE_Stage4
 Prob_PHE_Stage5	Real State Variable	Prob_PHE_Stage5
 Prob_PHE_Stage6	Real State Variable	Prob_PHE_Stage6
 Starved_Stage1	Integer State Variable	Starved_Stage1
 Starved_Stage2	Integer State Variable	Starved_Stage2
 Starved_Stage3	Integer State Variable	Starved_Stage3
 Starved_Stage4	Integer State Variable	Starved_Stage4
 Starved_Stage5	Integer State Variable	Starved_Stage5
 Starved_Stage6	Integer State Variable	Starved_Stage6

ANEXO VI – Implementação do método QLE no SIMIO™



- QLE_Stage1
- QLE_Stage2
- QLE_Stage3
- QLE_Stage4
- QLE_Stage5
- QLE_Stage6

Real State Variable
 Real State Variable

QLE_Stage1
 QLE_Stage2
 QLE_Stage3
 QLE_Stage4
 QLE_Stage5
 QLE_Stage6

ANEXO VII – Resultados para diversos níveis de *alfa*

PFS		RANDOM		ODD		
Interchangeability	Efficiency	ALFA	Ptardy (%)	Lateness (horas)	Tardiness (horas)	TTT (horas)
100%	100%	0,9	85,70	22,43	23,37	67,43
100%	100%	0,8	85,52	22,38	23,42	67,38
100%	100%	0,7	85,32	22,41	23,40	67,40
100%	100%	0,6	85,23	22,19	23,23	67,19
100%	100%	0,5	85,44	22,78	23,80	67,77
100%	100%	0,4	84,48	22,37	23,48	67,37
100%	100%	0,3	84,96	21,92	23,00	66,92
100%	100%	0,2	85,57	22,52	23,57	67,52
100%	100%	0,1	85,17	21,90	23,01	66,90

PFS		RANDOM		MODD		
Interchangeability	Efficiency	ALFA	Ptardy (%)	Lateness (horas)	Tardiness (horas)	TTT (horas)
100%	100%	0,9	24,74	0,66	4,92	45,66
100%	100%	0,8	25,96	0,77	4,90	45,77
100%	100%	0,7	26,42	0,73	4,86	45,73
100%	100%	0,6	27,00	0,78	4,89	45,78
100%	100%	0,5	27,11	0,61	4,83	45,60
100%	100%	0,4	26,98	0,17	4,59	45,18
100%	100%	0,3	27,25	0,26	4,74	45,26
100%	100%	0,2	27,50	0,03	4,67	45,03
100%	100%	0,1	27,52	-0,37	4,47	44,63

PFS		RANDOM		S/PTT+SRT		
Interchangeability	Efficiency	ALFA	Ptardy (%)	Lateness (horas)	Tardiness (horas)	TTT (horas)
100%	100%	0,9	9,16	-11,84	4,77	33,16
100%	100%	0,8	9,20	-11,51	4,78	33,49
100%	100%	0,7	9,06	-11,76	4,49	33,23
100%	100%	0,6	9,50	-10,94	4,80	34,07
100%	100%	0,5	9,59	-10,72	4,74	34,27
100%	100%	0,4	9,46	-10,95	4,54	34,05
100%	100%	0,3	9,65	-10,73	4,49	34,27
100%	100%	0,2	9,60	-10,79	4,24	34,21
100%	100%	0,1	10,09	-10,18	4,38	34,82

Porcentagem de Trabalhos Atrasados		Desempenho em relação ao ótimo			
Valor Alfa	Metodos	ODD	S/PTT+SRT	MODD	Total
0,4	ODD	0,00	-0,40	-2,24	-2,64
0,7	S/PTT+SRT	-0,84	0,00	-1,68	-2,52
0,9	MODD	-1,22	-0,10	0,00	-1,32

¹ A quarta tabela deste anexo apresenta as diferenças, absolutas, de performance para os melhores alfas de cada regra de sequenciamento, sendo escolhido aquele que menos deterioração traz ao conjunto das regras, sendo esse valor 0.9.

ANEXO VIII – Resultados obtidos para todos os cenários na FFS

P/ardy (%)	Metodos de despacho																
	FCFS			SPT			ODD			MODD			S/RTT+SRT				
	Performance Efficiency																
Metodos	100	90	80	100	90	80	100	90	80	100	90	80	100	90	80		
Interchangeability	Random	100%	75.9% (+0.83)	80.3% (+0.66)	85.0% (+0.68)	10.4% (+0.10)	11.7% (+0.11)	13.3% (+0.12)	85.7% (+0.66)	89.5% (+0.65)	92.5% (+0.49)	24.7% (+0.31)	27.2% (+0.30)	30.1% (+0.35)	9.2% (+0.19)	10.6% (+0.18)	12.5% (+0.18)
		50%	76.3% (+0.91)	78.6% (+0.72)	81.8% (+0.69)	10.1% (+0.10)	10.8% (+0.10)	11.6% (+0.10)	86.5% (+0.74)	88.3% (+0.67)	90.9% (+0.45)	27.5% (+0.34)	28.5% (+0.30)	29.9% (+0.26)	8.9% (+0.15)	9.5% (+0.17)	10.7% (+0.17)
		25%	76.3% (+0.86)	77.4% (+0.71)	80.1% (+0.71)	9.7% (+0.10)	10.0% (+0.10)	10.6% (+0.11)	84.2% (+0.86)	85.7% (+0.67)	87.2% (+0.61)	29.2% (+0.35)	29.9% (+0.33)	30.5% (+0.31)	8.4% (+0.15)	8.7% (+0.14)	9.3% (+0.17)
	PHE	100%	21.4% (+0.79)	27.9% (+0.87)	34.5% (+0.95)	5.6% (+0.14)	6.6% (+0.16)	8.1% (+0.20)	19.8% (+1.08)	26.8% (+1.27)	37.3% (+1.46)	7.2% (+0.38)	10.0% (+0.42)	13.8% (+0.49)	3.3% (+0.14)	4.4% (+0.17)	5.7% (+0.19)
		50%	26.8% (+0.92)	30.3% (+0.94)	33.8% (+1.04)	5.7% (+0.10)	6.1% (+0.12)	6.8% (+0.13)	24.4% (+1.02)	28.9% (+1.26)	33.9% (+1.57)	8.7% (+0.37)	9.9% (+0.41)	11.8% (+0.42)	3.1% (+0.17)	3.6% (+0.18)	4.1% (+0.11)
		25%	38.2% (+0.93)	40.9% (+1.05)	42.7% (+0.97)	6.6% (+0.11)	6.9% (+0.10)	7.1% (+0.10)	39.2% (+1.33)	39.8% (+1.15)	43.0% (+1.30)	13.8% (+0.41)	14.1% (+0.42)	15.0% (+0.39)	4.1% (+0.09)	4.2% (+0.11)	4.3% (+0.11)
	OLE	100%	6.5% (+0.65)	5.6% (+0.56)	2.4% (+0.29)	2.3% (+0.07)	2.2% (+0.06)	1.5% (+0.06)	5.4% (+0.68)	4.1% (+0.53)	1.6% (+0.35)	2.4% (+0.30)	1.9% (+0.23)	0.8% (+0.15)	1.0% (+0.06)	0.8% (+0.04)	0.5% (+0.03)
		50%	10.7% (+0.81)	11.6% (+0.88)	8.6% (+0.53)	2.8% (+0.07)	2.8% (+0.09)	2.5% (+0.06)	7.5% (+0.84)	8.8% (+0.81)	6.4% (+0.75)	3.9% (+0.37)	3.6% (+0.34)	2.5% (+0.23)	1.1% (+0.06)	1.2% (+0.05)	1.0% (+0.05)
		25%	21.8% (+0.86)	22.0% (+0.82)	20.3% (+0.80)	4.2% (+0.09)	4.1% (+0.08)	4.0% (+0.08)	18.6% (+1.00)	17.7% (+1.10)	16.3% (+0.98)	7.3% (+0.38)	7.5% (+0.40)	7.1% (+0.39)	1.9% (+0.06)	1.9% (+0.07)	1.9% (+0.07)
TTT (Horas)	Random	100%	67.09 (+1.01)	72.11 (+1.12)	79.39 (+1.33)	26.18 (+0.22)	28.14 (+0.23)	30.37 (+0.26)	67.25 (+1.03)	72.38 (+1.06)	79.39 (+1.37)	45.39 (+0.23)	46.42 (+0.23)	48.26 (+0.31)	33.09 (+0.34)	25.16 (+0.34)	27.42 (+0.32)
		50%	67.38 (+1.08)	69.53 (+1.02)	73.55 (+1.35)	25.51 (+0.21)	26.59 (+0.20)	28.19 (+0.23)	70.13 (+1.05)	72.29 (+1.05)	78.24 (+1.17)	46.13 (+0.24)	46.45 (+0.24)	47.36 (+0.21)	33.25 (+0.31)	24.09 (+0.30)	25.48 (+0.32)
		25%	67.02 (+1.06)	68.59 (+1.19)	72.27 (+1.16)	25.28 (+0.20)	25.55 (+0.20)	26.57 (+0.26)	70.39 (+1.21)	73.13 (+1.18)	73.58 (+1.18)	46.22 (+0.25)	46.41 (+0.24)	47.07 (+0.23)	33.03 (+0.30)	25.32 (+0.21)	26.17 (+0.30)
	PHE	100%	33.49 (+0.41)	37.04 (+0.48)	39.57 (+0.55)	18.55 (+0.14)	20.17 (+0.17)	22.05 (+0.21)	35.21 (+0.43)	37.58 (+0.52)	41.46 (+0.60)	33.09 (+0.27)	34.45 (+0.27)	36.46 (+0.28)	22.44 (+0.22)	24.32 (+0.25)	26.21 (+0.25)
		50%	36.43 (+0.44)	38.25 (+0.45)	38.54 (+0.51)	19.35 (+0.14)	20.13 (+0.15)	21.20 (+0.16)	37.29 (+0.43)	38.54 (+0.48)	40.57 (+0.64)	34.39 (+0.24)	35.27 (+0.29)	36.37 (+0.28)	23.16 (+0.20)	24.09 (+0.18)	25.10 (+0.21)
		25%	41.25 (+0.47)	42.50 (+0.49)	43.35 (+0.48)	20.56 (+0.14)	21.21 (+0.14)	21.46 (+0.13)	42.54 (+0.60)	42.56 (+0.48)	44.10 (+0.55)	37.37 (+0.27)	37.50 (+0.26)	38.12 (+0.23)	25.31 (+0.21)	25.32 (+0.21)	26.17 (+0.20)
	OLE	100%	27.07 (+0.34)	26.01 (+0.35)	22.49 (+0.28)	17.27 (+0.10)	17.20 (+0.10)	16.25 (+0.10)	28.35 (+0.38)	27.21 (+0.31)	23.57 (+0.25)	28.11 (+0.30)	27.05 (+0.28)	23.51 (+0.26)	19.53 (+0.17)	19.20 (+0.15)	18.04 (+0.12)
		50%	27.38 (+0.40)	30.00 (+0.42)	28.29 (+0.31)	17.58 (+0.10)	18.04 (+0.11)	17.50 (+0.08)	30.29 (+0.38)	30.31 (+0.31)	29.21 (+0.31)	30.15 (+0.30)	29.56 (+0.31)	28.40 (+0.27)	20.38 (+0.17)	20.42 (+0.15)	20.23 (+0.15)
		25%	34.33 (+0.41)	34.45 (+0.40)	34.04 (+0.38)	19.01 (+0.11)	19.07 (+0.10)	19.05 (+0.10)	35.16 (+0.39)	35.09 (+0.42)	34.40 (+0.42)	33.31 (+0.28)	33.40 (+0.27)	33.11 (+0.27)	22.22 (+0.14)	22.24 (+0.15)	22.31 (+0.16)
Lateness (Horas)	Random	100%	22.09 (+1.01)	27.11 (+1.12)	34.40 (+1.33)	-18.41 (+0.22)	-16.45 (+0.23)	-14.22 (+0.26)	22.25 (+1.03)	27.38 (+1.06)	34.39 (+1.37)	0.39 (+0.23)	1.42 (+0.23)	3.26 (+0.31)	-11.50 (+0.34)	-9.43 (+0.34)	-7.17 (+0.33)
		50%	22.38 (+1.08)	24.53 (+1.02)	28.55 (+1.35)	-19.07 (+0.21)	-17.59 (+0.20)	-16.40 (+0.23)	25.13 (+1.05)	27.29 (+1.05)	33.24 (+1.17)	1.13 (+0.24)	1.44 (+0.24)	2.36 (+0.21)	-11.33 (+0.31)	-10.50 (+0.30)	-9.11 (+0.32)
		25%	22.02 (+1.06)	23.59 (+1.19)	27.28 (+1.16)	-19.31 (+0.20)	-19.04 (+0.20)	-18.02 (+0.26)	25.39 (+1.21)	28.13 (+1.18)	28.59 (+1.18)	1.22 (+0.25)	1.41 (+0.24)	2.07 (+0.23)	-11.56 (+0.30)	-11.38 (+0.25)	-10.43 (+0.30)
	PHE	100%	-11.10 (+0.41)	-7.55 (+0.48)	-5.02 (+0.55)	-26.04 (+0.14)	-24.42 (+0.17)	-22.54 (+0.21)	-9.38 (+0.43)	-7.01 (+0.52)	-3.13 (+0.60)	-11.50 (+0.27)	-10.14 (+0.27)	-8.12 (+0.28)	-22.15 (+0.22)	-20.27 (+0.25)	-18.38 (+0.25)
		50%	-8.16 (+0.44)	-6.34 (+0.45)	-4.47 (+0.51)	-25.24 (+0.14)	-24.46 (+0.15)	-23.40 (+0.16)	-7.30 (+0.44)	-6.05 (+0.48)	-4.01 (+0.64)	-10.20 (+0.24)	-9.32 (+0.29)	-8.21 (+0.28)	-21.43 (+0.20)	-20.50 (+0.18)	-19.49 (+0.21)
		25%	-3.34 (+0.47)	-2.09 (+0.49)	-1.25 (+0.48)	-24.03 (+0.14)	-23.39 (+0.14)	-23.13 (+0.13)	-2.05 (+0.60)	-2.03 (+0.48)	-0.49 (+0.55)	-7.22 (+0.26)	-7.09 (+0.26)	-6.46 (+0.23)	-19.28 (+0.21)	-19.28 (+0.21)	-18.42 (+0.20)
	OLE	100%	-17.52 (+0.35)	-18.58 (+0.35)	-22.10 (+0.28)	-27.32 (+0.10)	-27.39 (+0.10)	-28.34 (+0.09)	-16.24 (+0.38)	-17.38 (+0.31)	-21.02 (+0.25)	-16.48 (+0.30)	-17.54 (+0.29)	-21.09 (+0.26)	-25.06 (+0.17)	-25.39 (+0.15)	-26.55 (+0.12)
		50%	-15.15 (+0.40)	-14.59 (+0.42)	-16.31 (+0.31)	-27.01 (+0.10)	-26.55 (+0.11)	-27.09 (+0.08)	-14.30 (+0.38)	-14.28 (+0.34)	-15.38 (+0.40)	-14.44 (+0.29)	-15.04 (+0.31)	-16.19 (+0.27)	-24.21 (+0.17)	-24.17 (+0.15)	-24.36 (+0.15)
		25%	-10.26 (+0.40)	-10.14 (+0.40)	-10.55 (+0.38)	-25.58 (+0.11)	-25.52 (+0.10)	-25.54 (+0.10)	-9.43 (+0.39)	-9.50 (+0.42)	-10.19 (+0.42)	-11.28 (+0.28)	-11.19 (+0.27)	-11.48 (+0.27)	-22.36 (+0.14)	-22.35 (+0.15)	-22.28 (+0.16)
Tardiness (Horas)	Random	100%	24.39 (+0.90)	29.08 (+1.05)	36.03 (+1.26)	5.58 (+0.18)	6.46 (+0.18)	7.46 (+0.21)	23.22 (+0.98)	28.21 (+1.02)	35.06 (+1.34)	4.55 (+0.18)	5.38 (+0.18)	7.03 (+0.25)	4.45 (+0.17)	5.38 (+0.20)	6.38 (+0.20)
		50%	25.06 (+0.97)	27.00 (+0.93)	30.39 (+1.27)	5.40 (+0.16)	6.12 (+0.15)	6.45 (+0.19)	26.16 (+0.99)	28.21 (+1.00)	34.01 (+1.14)	5.06 (+0.18)	5.26 (+0.17)	6.07 (+0.17)	4.42 (+0.16)	4.55 (+0.17)	5.36 (+0.18)
		25%	24.26 (+0.96)	26.13 (+1.11)	29.24 (+1.09)	5.24 (+0.15)	5.34 (+0.15)	6.08 (+0.20)	26.57 (+1.14)	29.20 (+1.13)	30.00 (+1.13)	5.08 (+0.18)	5.21 (+0.17)	5.39 (+0.17)	4.23 (+0.13)	4.46 (+0.16)	5.06 (+0.16)
	PHE	100%	2.19 (+0.18)	3.32 (+0.24)	4.54 (+0.29)	1.13 (+0.06)	1.31 (+0.07)	1.57 (+0.10)	1.46 (+0.17)	2.40 (+0.26)	4.23 (+0.33)	0.32 (+0.05)	0.46 (+0.06)	1.14 (+0.07)	0.44 (+0.05)	1.01 (+0.06)	1.22 (+0.07)
		50%	3.03 (+0.20)	3.45 (+0.21)	4.33 (+0.28)	1.44 (+0.07)	1.48 (+0.08)	2.06 (+0.09)	2.15 (+0.21)	2.49 (+0.24)	3.47 (+0.39)	0.40 (+0.06)	0.48 (+0.06)	1.01 (+0.07)	0.58 (+0.06)	1.06 (+0.05)	1.15 (+0.06)
		25%	5.03 (+0.26)	5.48 (+0.29)	6.08 (+0.30)	2.24 (+0.08)	2.29 (+0.08)	2.32 (+0.07)	4.45 (+0.37)	4.43 (+0.30)	5.25 (+0.36)	1.17 (+0.08)	1.17 (+0.07)	1.23 (+0.07)	1.37 (+0.07)	1.32 (+0.08)	1.38 (+0.07)
	OLE	100%	0.26 (+0.09)	0.21 (+0.07)	0.07 (+0.02)	0.36 (+0.04)	0.31 (+0.03)	0.18 (+0.02)	0.19 (+0.08)	0.13 (+0.05)	0.04 (+0.02)	0.06 (+0.02)	0.05 (+0.02)	0.01 (+0.01)	0.16 (+0.02)	0.12 (+0.02)	0.06 (+0.01)
		50%	0.50 (+0.13)	0.53 (+0.13)	0.35 (+0.06)	0.40 (+0.04)	0.38 (+0.04)	0.31 (+0.03)	0.28 (+0.10)	0.37 (+0.11)	0.25 (+0.10)	0.11 (+0.03)	0.11 (+0.03)	0.07 (+0.02)	0.18 (+0.03)	0.18 (+0.03)	0.15 (+0.02)
		25%	2.02 (+0.17)	2.05 (+0.16)	1.49 (+0.13)	0.57 (+0.05)	0.57 (+0.04)	0.53 (+0.04)	1.29 (+0.16)	1.26 (+0.17)	1.19 (+0.16)	0.26 (+0.05)	0.26 (+0.04)	0.24 (+0.04)	0.29 (+0.03)	0.27 (+0.03)	0.27 (+0.03)
Utilização (%)	Random	100%	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.1% (+0.30)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.30)	90.0% (+0.27)	90.1% (+0.27)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.26)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.29)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.28)
		50%	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.28)	90.1% (+0.28)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.1% (+0.27)	90.1% (+0.26)	90.0% (+0.28)	90.1% (+0.28)
		25%	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.26)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.28)	89.9% (+0.27)	90.1% (+0.26)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.26)	89.9% (+0.27)	90.0% (+0.29)
	PHE	100%	90.0% (+0.15)	90.2% (+0.17)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.16)	89.9% (+0.18)	90.0% (+0.16)	89.9% (+0.17)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.15)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.17)	90.1% (+0.17)	90.0% (+0.18)
		50%	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.18)	90.1% (+0.18)	90.1% (+0.16)	90.1% (+0.17)	90.1% (+0.18)	90.0% (+0.15)	90.0% (+0.17)	90.1% (+0.17)	90.1% (+0.16)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.18)
		25%	90.0% (+0.18)	90.1% (+0.18)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.19)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.18)	90.2% (+0.19)	90.0% (+0.17)	90.1% (+0.18)	90.0% (+0.19)	90.1% (+0.19)	90.0% (+0.18)	90.1% (+0.19)	89.9% (+0.18)	90.0% (+0.18)
	OLE	100%	90.0% (+0.88)	88.2% (+0.24)	84.5% (+0.28)	90.0% (+0.86)	88.2% (+0.24)	84.4% (+0.29)	89.9% (+0.86)	88.2% (+0.24)	84.4% (+0.28)	90.0% (+0.87)	88.2% (+0.24)	84.4% (+0.28)	90.0% (+0.87)	88.1% (+0.24)	84.5% (+0.28)
		50%	89.9% (+0.56)	89.4% (+0.21)	87.9% (+0.23)	90.0% (+0.59)	89.3% (+0.22)	87.7% (+0.24)	90.0% (+0.55)	89.3% (+0.21)	87.9% (+0.24)	90.1% (+0.53)	89.3% (+0.22)	87.9% (+0.23)	90.0% (+0.59)	89.3% (+0.22)	87.9% (+0.23)
		25%	89.9% (+0.34)	89.7% (+0.19)	89.1% (+0.20)	90.1% (+0.39)	89.7% (+0.20)	89.1% (+0.20)	90.0% (+0.33)	89.8% (+0.20)	89.2% (+0.20)	90.0% (+0.34)	89.8% (+0.19)	89.2% (+0.20)	90.0% (+0.37)	89.7% (+0.19)	89.3% (+0.21)

ANEXO IX – Resultados obtidos para todos os cenários na FFS

Ptdy (%)	Metodos de despacho																																			
	FCFS				SPT				ODD				MODD				S/RTT+SRT																			
	Performance Efficiency																																			
Metodos	100		90		80		100		90		80		100		90		80		100		90		80													
Interchangeability	Random	100%	55.2% (+0.42)	58.4% (+0.47)	61.1% (+0.44)	10.3% (+0.07)	11.4% (+0.06)	12.9% (+0.08)	40.6% (+0.49)	44.5% (+0.44)	48.8% (+0.51)	18.1% (+0.23)	19.7% (+0.24)	22.1% (+0.27)	9.1% (+0.13)	11.2% (+0.14)	12.9% (+0.14)	25%	15.1% (+0.49)	16.0% (+0.41)	17.4% (+0.45)	10.0% (+0.07)	10.3% (+0.06)	10.7% (+0.08)	40.6% (+0.45)	42.3% (+0.53)	43.5% (+0.52)	17.3% (+0.21)	17.9% (+0.22)	18.6% (+0.23)	9.4% (+0.14)	9.8% (+0.14)	10.2% (+0.14)			
	PHE	100%	23.3% (+0.43)	26.9% (+0.47)	31.4% (+0.50)	7.4% (+0.10)	8.5% (+0.12)	10.0% (+0.15)	20.9% (+0.47)	24.3% (+0.48)	29.0% (+0.52)	7.9% (+0.17)	9.4% (+0.20)	11.6% (+0.21)	6.3% (+0.13)	7.4% (+0.16)	8.8% (+0.17)	50%	16.1% (+0.47)	17.9% (+0.52)	20.6% (+0.49)	6.9% (+0.09)	7.4% (+0.08)	8.0% (+0.10)	20.0% (+0.32)	22.1% (+0.38)	24.2% (+0.42)	8.2% (+0.15)	8.9% (+0.17)	9.8% (+0.17)	6.0% (+0.09)	6.6% (+0.10)	7.3% (+0.12)			
	QLE	100%	12.5% (+0.44)	11.2% (+0.40)	7.2% (+0.30)	3.1% (+0.06)	3.0% (+0.05)	2.2% (+0.04)	11.2% (+0.29)	9.8% (+0.21)	6.6% (+0.14)	4.0% (+0.11)	3.8% (+0.10)	2.5% (+0.07)	2.8% (+0.07)	2.5% (+0.06)	1.7% (+0.04)	50%	16.2% (+0.45)	15.9% (+0.48)	14.6% (+0.36)	4.1% (+0.06)	4.3% (+0.06)	4.0% (+0.06)	12.9% (+0.25)	13.2% (+0.26)	11.7% (+0.23)	5.1% (+0.12)	5.1% (+0.11)	4.6% (+0.11)	3.5% (+0.09)	3.5% (+0.07)	3.2% (+0.07)			
	25%	23.6% (+0.40)	23.5% (+0.44)	23.2% (+0.46)	6.1% (+0.06)	6.2% (+0.07)	6.1% (+0.06)	19.8% (+0.33)	19.8% (+0.31)	19.1% (+0.34)	7.4% (+0.11)	7.5% (+0.13)	7.2% (+0.11)	5.3% (+0.09)	5.3% (+0.08)	5.1% (+0.09)																				
	TTT (Horas)	Random	100%	39.18 (+0.51)	42.47 (+0.67)	45.59 (+0.70)	15.34 (+0.11)	16.37 (+0.12)	18.06 (+0.14)	39.07 (+0.52)	42.12 (+0.57)	45.36 (+0.69)	22.47 (+0.18)	23.47 (+0.19)	25.18 (+0.22)	22.40 (+0.17)	23.53 (+0.19)	25.23 (+0.19)	25%	39.15 (+0.56)	39.51 (+0.50)	41.37 (+0.60)	15.18 (+0.10)	15.38 (+0.11)	16.00 (+0.14)	38.38 (+0.51)	40.18 (+0.54)	41.26 (+0.63)	22.14 (+0.17)	22.32 (+0.17)	23.06 (+0.18)	22.15 (+0.18)	22.43 (+0.18)	23.01 (+0.18)		
		PHE	100%	19.50 (+0.12)	21.20 (+0.14)	23.23 (+0.17)	11.21 (+0.08)	12.16 (+0.09)	13.22 (+0.11)	21.16 (+0.25)	22.56 (+0.29)	25.01 (+0.31)	14.59 (+0.12)	15.53 (+0.14)	17.23 (+0.15)	15.14 (+0.13)	16.15 (+0.14)	17.20 (+0.15)	50%	21.03 (+0.12)	21.50 (+0.15)	22.54 (+0.15)	11.42 (+0.09)	12.07 (+0.09)	12.37 (+0.09)	22.06 (+0.23)	23.13 (+0.26)	24.19 (+0.30)	15.33 (+0.13)	16.05 (+0.14)	16.41 (+0.14)	15.38 (+0.12)	16.18 (+0.14)	17.03 (+0.14)		
		QLE	100%	15.47 (+0.19)	15.09 (+0.18)	13.16 (+0.14)	9.06 (+0.06)	9.10 (+0.05)	8.37 (+0.04)	16.40 (+0.23)	15.47 (+0.17)	13.26 (+0.11)	12.08 (+0.10)	12.05 (+0.11)	10.44 (+0.07)	12.29 (+0.11)	12.11 (+0.09)	10.45 (+0.07)	50%	17.11 (+0.20)	17.04 (+0.20)	16.27 (+0.16)	10.03 (+0.05)	10.14 (+0.06)	10.08 (+0.05)	18.16 (+0.18)	18.33 (+0.22)	17.35 (+0.17)	13.37 (+0.11)	13.40 (+0.09)	13.20 (+0.10)	13.48 (+0.12)	13.48 (+0.12)	13.21 (+0.10)		
		25%	20.08 (+0.19)	19.59 (+0.21)	19.53 (+0.20)	11.15 (+0.05)	11.24 (+0.06)	11.19 (+0.05)	22.15 (+0.24)	22.16 (+0.24)	21.51 (+0.22)	15.32 (+0.10)	15.39 (+0.10)	15.28 (+0.10)	15.47 (+0.10)	15.49 (+0.11)	15.38 (+0.10)																			
		Lateness (Horas)	Random	100%	9.18 (+0.51)	12.47 (+0.67)	15.58 (+0.70)	-14.26 (+0.11)	-13.22 (+0.12)	-11.53 (+0.14)	9.07 (+0.52)	12.12 (+0.57)	15.35 (+0.69)	-7.12 (+0.18)	-6.11 (+0.19)	-4.41 (+0.22)	-7.19 (+0.17)	-6.06 (+0.19)	-4.37 (+0.19)	25%	9.15 (+0.56)	9.51 (+0.50)	11.37 (+0.60)	-14.40 (+0.10)	-14.21 (+0.11)	-13.59 (+0.14)	8.38 (+0.51)	10.18 (+0.54)	11.26 (+0.63)	-7.45 (+0.17)	-7.27 (+0.17)	-6.53 (+0.18)	-7.44 (+0.18)	-7.16 (+0.18)	-6.58 (+0.18)	
PHE			100%	-10.09 (+0.22)	-8.39 (+0.26)	-6.36 (+0.29)	-18.38 (+0.08)	-17.43 (+0.09)	-16.37 (+0.11)	8.43 (+0.25)	7.03 (+0.29)	4.58 (+0.31)	-15.00 (+0.12)	-14.06 (+0.14)	-12.36 (+0.15)	-14.45 (+0.13)	-13.44 (+0.14)	-12.39 (+0.14)	50%	8.56 (+0.24)	8.09 (+0.27)	7.05 (+0.25)	-18.17 (+0.09)	-17.52 (+0.09)	-17.22 (+0.09)	7.53 (+0.23)	6.46 (+0.26)	5.40 (+0.30)	-14.26 (+0.13)	-13.55 (+0.14)	-13.18 (+0.14)	-14.21 (+0.12)	-13.41 (+0.14)	-12.56 (+0.14)		
QLE			100%	14.12 (+0.19)	-14.50 (+0.18)	-16.43 (+0.14)	-20.53 (+0.06)	-20.49 (+0.05)	-21.22 (+0.04)	-13.19 (+0.23)	-14.12 (+0.17)	-16.33 (+0.11)	-17.51 (+0.10)	-17.54 (+0.11)	-19.15 (+0.07)	-17.30 (+0.11)	-17.48 (+0.09)	-19.14 (+0.07)	50%	12.48 (+0.20)	-12.55 (+0.20)	-13.32 (+0.16)	-19.56 (+0.05)	-19.45 (+0.06)	-19.51 (+0.05)	-11.43 (+0.18)	-11.26 (+0.22)	-12.24 (+0.17)	-16.22 (+0.11)	-16.18 (+0.09)	-16.39 (+0.10)	-16.11 (+0.12)	-16.11 (+0.11)	-16.36 (+0.10)		
25%			9.52 (+0.19)	-10.00 (+0.21)	-10.06 (+0.20)	-18.44 (+0.06)	-18.36 (+0.06)	-18.40 (+0.05)	7.44 (+0.24)	7.43 (+0.24)	8.08 (+0.22)	14.28 (+0.10)	14.20 (+0.11)	14.31 (+0.10)	14.12 (+0.10)	14.31 (+0.10)	14.12 (+0.10)																			
Tardiness (Horas)			Random	100%	16.11 (+0.43)	19.09 (+0.58)	21.55 (+0.62)	4.25 (+0.09)	4.54 (+0.09)	5.39 (+0.12)	17.13 (+0.45)	19.37 (+0.50)	22.16 (+0.62)	3.27 (+0.09)	3.52 (+0.10)	4.34 (+0.13)	3.18 (+0.09)	3.49 (+0.10)	4.33 (+0.10)	25%	15.54 (+0.42)	17.43 (+0.58)	19.15 (+0.56)	4.14 (+0.09)	4.41 (+0.11)	5.04 (+0.13)	17.22 (+0.44)	18.43 (+0.53)	20.06 (+0.52)	3.19 (+0.10)	3.29 (+0.10)	3.56 (+0.11)	3.17 (+0.10)	3.31 (+0.10)	3.48 (+0.10)	
	PHE		100%	2.47 (+0.12)	3.31 (+0.14)	4.38 (+0.17)	1.21 (+0.04)	1.41 (+0.05)	2.03 (+0.06)	3.36 (+0.14)	4.24 (+0.17)	5.30 (+0.19)	0.54 (+0.03)	1.06 (+0.04)	1.29 (+0.05)	0.56 (+0.04)	1.09 (+0.04)	1.25 (+0.05)	50%	3.12 (+0.12)	3.34 (+0.15)	4.09 (+0.15)	1.39 (+0.05)	1.45 (+0.06)	1.53 (+0.06)	4.30 (+0.15)	5.02 (+0.17)	5.34 (+0.20)	1.00 (+0.04)	1.07 (+0.04)	1.14 (+0.04)	0.59 (+0.04)	1.07 (+0.04)	1.17 (+0.04)		
	QLE		100%	0.57 (+0.07)	0.50 (+0.06)	0.27 (+0.04)	0.37 (+0.02)	0.32 (+0.02)	0.18 (+0.01)	2.34 (+0.13)	2.08 (+0.08)	1.07 (+0.05)	0.19 (+0.02)	0.18 (+0.02)	0.09 (+0.01)	0.19 (+0.02)	0.16 (+0.01)	0.08 (+0.01)	25%	2.37 (+0.09)	2.32 (+0.10)	2.28 (+0.10)	1.09 (+0.03)	1.10 (+0.03)	1.04 (+0.03)	4.15 (+0.14)	4.12 (+0.16)	4.01 (+0.16)	0.39 (+0.02)	0.39 (+0.02)	0.36 (+0.02)	0.39 (+0.02)	0.38 (+0.02)	0.35 (+0.02)		
	Utilização (%)		Random	100%	90.0% (+0.26)	90.1% (+0.29)	89.9% (+0.29)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.28)	90.0% (+0.29)	90.0% (+0.26)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.28)	90.1% (+0.26)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.27)	25%	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.26)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	89.9% (+0.26)	90.1% (+0.28)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.27)	90.0% (+0.26)	90.0% (+0.28)	90.0% (+0.27)	90.1% (+0.27)	89.9% (+0.27)
			PHE	100%	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.17)	90.1% (+0.17)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.15)	89.9% (+0.17)	90.1% (+0.16)	90.1% (+0.16)	90.1% (+0.17)	90.0% (+0.17)	50%	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.17)	90.0% (+0.17)	90.1% (+0.18)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.18)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.17)	89.9% (+0.18)	89.9% (+0.17)	89.9% (+0.17)	89.9% (+0.17)	90.1% (+0.16)	90.1% (+0.16)	90.1% (+0.17)	90.0% (+0.17)
		QLE	100%	90.0% (+0.90)	88.2% (+0.23)	84.5% (+0.28)	90.0% (+0.16)	88.9% (+0.15)	85.8% (+0.16)	90.1% (+0.15)	88.9% (+0.16)	85.9% (+0.16)	89.9% (+0.15)	88.9% (+0.17)	85.9% (+0.16)	90.0% (+0.15)	88.9% (+0.16)	85.8% (+0.16)	25%	90.1% (+0.33)	89.7% (+0.20)	89.3% (+0.19)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.16)	89.5% (+0.15)	90.0% (+0.16)	90.0% (+0.16)	89.5% (+0.15)	89.5% (+0.16)	90.0% (+0.15)	89.9% (+0.16)	89.5% (+0.16)	90.0% (+0.15)	89.9% (+0.16)	89.5% (+0.16)	