



# SISTEMAS AUTÓNOMOS DE CONTROLO DE PRODUÇÃO (APC): AVALIAÇÃO USANDO A SIMULAÇÃO

TIAGO GONÇALVES CASTRO

novembro de 2020

# **SISTEMAS AUTÓNOMOS DE CONTROLO DE PRODUÇÃO (APC): AVALIAÇÃO USANDO A SIMULAÇÃO**

Tiago Gonçalves Castro  
1140534

**2019/2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# **SISTEMAS AUTÓNOMOS DE CONTROLO DE PRODUÇÃO (APC): AVALIAÇÃO USANDO A SIMULAÇÃO**

Tiago Gonçalves Castro  
1140534

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

**2019/2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Professora Doutora Marlene Ferreira, de Brito

Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Professor Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Co-orientador**

Professor Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco

## **Arguente**

Professora Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos Professora Auxiliar, Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo, Universidade de Aveiro



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor Luís Ferreira pela orientação e dedicação demonstradas, pelo interesse constante, cuidado e paciência para me ajudar a avançar.

Ao Prof. Doutor Nuno Octávio Fernandes pelo apoio e dedicação incansável, sempre disponível em tentar ajudar com os problemas que foram surgindo ao longo do percurso, quando não parecia haver solução.

Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional, por lutarem e facilitarem o meu percurso académico e a força suplementar que me deram para ganhar motivação na última fase numa situação global completamente nova para todos nós.

Aos meus amigos mais próximos que me acompanham nas diferentes fases da vida há 20 anos.



## PALAVRAS CHAVE

Controlo Autónomo de Produção (APC); Simulação; Planeamento de Produção; Controlo

## RESUMO

Atualmente, os sistemas de produção necessitam de lidar com ambientes produtivos cada vez mais complexos e dinâmicos. A progressiva evolução de fatores como o mercado, o produto, a tecnologia e o processo produtivo representa um grande desafio para as indústrias e para os sistemas que gerem a produção. Lidar com estes desafios é crucial para a eficiência dos sistemas de produção. Porém, os sistemas tradicionais de controlo da produção, caracterizados por abordagens centralizadas de planeamento e controlo, não são flexíveis para lidar com perturbações no ambiente de produção, tornando os mesmos menos apropriados para lidar com o aumento da complexidade e dinâmica. A evolução permitiu o surgimento de novos sistemas, de controlo autónomo, denominados sistemas APC (*Autonomous Production Control*), caracterizados pela capacidade de os elementos do sistema interagirem entre si e processarem informação, tendo como objetivo a reação rápida e flexível às mudanças ou alterações que possam ocorrer nos sistemas de produção.

Na dissertação aqui apresentada, são estudados três métodos de controlo autónomo de produção, QLE (*Queue Length Estimator*), PHE (*Pheromones*) e DWL (*Direct Workload*), em diferentes contextos produtivos. É introduzida uma decisão lançamento de trabalhos em produção e a decisão de despacho, testando o impacto das regras de sequenciação usadas a estes dois níveis de decisão.

Os métodos usados foram avaliados usando a simulação discreta, com recurso ao software de simulação Arena, com o objetivo de perceber melhor o comportamento de cada um deles. Os resultados obtidos mostram um desempenho superior do método DWL no cenário base e o próprio método melhora o seu desempenho quando são testadas diferentes configurações do limite do nível de carga nas máquinas. No método DWL e QLE, a alteração das regras de sequenciação na *pool* e de despacho nas máquinas permite um comportamento idêntico do sistema. No método PHE e RANDOM, num limite não restritivo, a alteração das regras de despacho nas máquinas tem impacto, tendo uma performance superior com a regra FCFS.



**KEYWORDS**

*Autonomous Production Control, Simulation, Production Planning, Control*

**ABSTRACT**

*Nowadays, production systems need to deal with increasingly complex and dynamic production environments. The progressive evolution of factors such as market, product, technology and production process represents a big challenge for the industries and production systems. Deal with these challenges is crucial to the efficiency of systems. However, traditional production control systems, characterized by centralized planning and control approaches, are not flexible to deal with disturbances in the production environment, making them less appropriate to cope with the increase in complexity and dynamics. The evolution allowed the creation of new systems, called APC (Autonomous Production Control) systems, characterized by the ability of the elements of the system to interact with each other and process information, aiming at the quick and flexible reaction to changes that occurs in production systems.*

*In this project three methods for the independent control of production, QLE (Queue Length Estimator), PHE (Pheromones) and DWL (Direct Workload) are studied in different productive contexts. A decision to release the works in production is introduced and the dispatch decision, testing the impact of the sequencing rules used at these two decision levels.*

*The methods used were evaluated using discrete simulation, using the ARENA simulation software, in order to understand the behavior of each one of them. The results show a superior performance of the DWL method in the base scenario and the method itself improves its performance when different configurations of the load level limit on the machines are tested. In the DWL and QLE method, changing the sequencing rules in the pool and in the machines allows identical behavior of the system. In the PHE and RANDOM, within a non-restrictive limit, changing the dispatching rules on the machines, has as impact, having a higher performance with FCFS rule.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

<Termo>	<Designação>
APC	<i>Autonomous Production Control</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
IoT	<i>Internet-of-Things</i>
QLE	<i>Queue Length Estimator</i>
DLRP	<i>Distributed Routing Logistics Protocol</i>
LSIRP	<i>Link-State internet routing protocol</i>
DD	<i>Due Date</i>
OLTPR	<i>One Logistics Target Per Rule (OLTPR)</i>
FFS	<i>Flexible Flow Shop</i>
SRB1	<i>Simple Rule Based 1</i>
SRB2	<i>Simple Rule Based 2</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
CHE	<i>Chemotaxis</i>
PHE	<i>Pheromone</i>
BMS	<i>Bionic Manufacturing System</i>
DWL	<i>Direct Workload</i>
EDD	<i>Earliest Due Date</i>
FCFS	<i>First Come First Served</i>
TT	<i>Throughput Time</i>
TTT	<i>Total Throughput Time</i>
CONWIP	<i>CONstant Work in Process</i>

### Lista de Unidades

<Termo>	<Designação>
H	Horas

### Lista de Símbolos

<Termo>	<Designação>
%	Percentagem



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

<Termo>	<Designação>
<i>Industry 4.0</i>	Aplicação de tecnologias avançadas, nomeadamente tecnologias de informação e comunicação, ao nível da produção com o objetivo de trazer valor para o cliente e para a própria organização.
<i>ARENA</i>	Software de simulação
<i>Gemba</i>	Espaço Fabril
<i>Lean</i>	Descreve uma filosofia de produção que procura reduzir e eliminar todas as formas de desperdícios.



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO	26
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES	33
FIGURA 3 - PRINCIPAIS AUTORES DOS ARTIGOS ANALISADOS	33
FIGURA 4 - FUNCIONAMENTO DO DLRP (REKERSBRINK, SCHOLZ-REITER, & ZABEL, 2010)	37
FIGURA 5 - ALGORITMO DO MÉTODO CHE (B. SCHOLZ-REITER, GÖRGES, JAGALSKI, & NAUJOK, 2010)	44
FIGURA 6 - CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS APC (ADAPTADO DE KATJA WINDT ET AL., (2010))	47
FIGURA 7 - GRAU DE SEMELHANÇA ENTRE OS MÉTODOS (KATJA WINDT ET AL., 2010)	48
FIGURA 8 - DIVISÃO DOS MÉTODOS EM GRUPOS (KATJA WINDT ET AL., 2010)	49
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA QUE DESCREVE O PERCURSO DO TRABALHO NO SISTEMA	53
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA CRIAÇÃO DOS TRABALHOS	55
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO NAS MÁQUINAS	56
FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO DO PROCESSAMENTO DOS TRABALHOS NAS MÁQUINAS (MÉTODO QLE)	57
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DO INCREMENTO DO NÍVEL DE CARGA NA MÁQUINA ( <i>ASSIGN</i> ENTRADA)	57
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DO DECREMENTO DO NÍVEL DE CARGA NA MÁQUINA ( <i>ASSIGN</i> SAÍDA)	57
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DA DECISÃO NO QLE	58
FIGURA 16 - FILA DE ESPERA ANTES DE CADA ESTÁGIO DE PRODUÇÃO	59
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO DE DECISÃO EM FUNÇÃO DO LIMITE DE CARGA NO MÉTODO DWL	59
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO DA FÓRMULA (3) NO MÉTODO PHE	60
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO DA DECISÃO NO PHE	61
FIGURA 20 - DEMONSTRAÇÃO DO SISTEMA DE GESTÃO DE NÚMERO DE TRABALHOS NO SISTEMA	62
FIGURA 21 - PLANO EXPERIMENTAL	63
FIGURA 22 - VERIFICAÇÃO DOS ATRASOS DOS TRABALHOS	64
FIGURA 23 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO - CENÁRIO BASE	71
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO DE VALORES COM ALTERAÇÃO DA REGRA DE DESPACHO NAS MÁQUINAS	73
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO DE VALORES COM ALTERAÇÃO DA REGRA DE SEQUENCIAÇÃO NA <i>POOL</i>	75
FIGURA 26 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA OS DIFERENTES LIMITES DE CARGA NO DWL	78
FIGURA 27 - COMPARAÇÃO DE VALORES COM ALTERAÇÃO DA REGRA DE SEQUENCIAÇÃO NA <i>POOL</i> NO DWL-2	79
FIGURA 28 - RESULTADOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO PARA OS DIFERENTES VALORES DA CONSTANTE EVAPORAÇÃO NO PHE	81



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - NOVAS CONDIÇÕES E REQUISITOS PARA OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO (KATJA WINDT & HÜLSMANN, 2007)	29
TABELA 2 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE CONTROLO AUTÓNOMO E MODELOS CONVENCIONAIS	31
TABELA 3 - TABELA QUE REPRESENTA A EVOLUÇÃO DO ESTUDO DO TEMA COM NOVAS VARIÁVEIS	34
TABELA 4 - MÉTODOS ASSOCIADOS A CADA TIPO (SEBASTIAN GRUNDSTEIN ET AL., 2015)	35
TABELA 5 - REPRESENTAÇÃO DA MATRIZ DE SIMILARIDADE PARA OS DADOS TEMPORAIS	48
TABELA 6 - TEMPOS DE PROCESSAMENTO ATRIBUÍDOS NAS MÁQUINAS	54
TABELA 7 - CARATERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA	55
TABELA 8 - LIMITE DE CARGA NOS ESTÁGIOS DE PRODUÇÃO (DWL)	63
TABELA 9 - LIMITE DE CARGA DO MÉTODO DWL-2	76
TABELA 10 - LIMITE DE CARGA DO MÉTODO DWL-2.5	77
TABELA 11 - COMBINAÇÃO DOS MELHORES LIMITES DE CARGA EM CADA UM DOS ESTÁGIOS	79



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	VII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	XIII
GLOSSÁRIO DE TERMOS .....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIX
ÍNDICE .....	XXI
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 Enquadramento .....	25
1.2 Objetivos .....	26
1.3 Metodologia e estrutura do relatório .....	26
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1 Sistemas Autónomos de Controlo de Produção .....	29
2.2 Análise bibliométrica.....	32
2.3 Métodos APC.....	35
2.3.1 Identificação dos principais métodos.....	35
2.3.2 Resumo descritivo de cada um dos métodos racionais .....	36
2.3.3 Resumo descritivo de cada um dos métodos bio analógicos.....	41
2.4 Classificação dos métodos .....	47
<b>3 MODELO DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>53</b>
3.1 Sistema de produção.....	53

3.2	Descrição do modelo.....	55
3.2.1	Métodos APC.....	56
3.2.2	Regras de despacho.....	61
3.2.3	Lançamento controlado de trabalhos no sistema .....	62
3.3	Plano experimental e medidas de desempenho.....	62
4	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	69
4.1	Cenário Base: Impacto dos métodos APC no desempenho do sistema .....	69
4.2	Impacto da alteração das regras de sequenciação das filas de espera nas máquinas para despacho .....	73
4.3	Impacto da alteração das regras de sequenciação na <i>pool</i> para lançamento em produção .....	74
4.4	Análise de sensibilidade .....	76
4.4.1	Alteração do limite de carga no DWL .....	76
4.4.2	Alteração da constante de evaporação no PHE .....	80
4.5	Análise do melhor cenário para cada método .....	82
5	CONCLUSÃO .....	85
5.1	Principais contributos do trabalho .....	85
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	86
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	89
	APÊNDICES .....	95
	APÊNDICE I- Amostra de artigos utilizada na revisão de literatura .....	95
	APÊNDICE II - Representação do estágio produtivo no QLE .....	102
	APÊNDICE III - Representação do estágio produtivo no DWL .....	103
	APÊNDICE IV – Representação do estágio produtivo no PHE .....	104
	APÊNDICE V – Resultados obtidos para todos os cenários .....	105

# 1. INTRODUÇÃO

- 1.1 Enquadramento
- 1.2 Objetivo
- 1.3 Metodologia e estrutura



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Este projeto surge no âmbito da dissertação de mestrado, do ramo de Gestão Industrial, do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Para a realização da dissertação, foram estudados os sistemas autónomos de controlo de produção, usando a simulação discreta.

No âmbito da *Indústria 4.0*, o aparecimento de novas tecnologias permitiu o desenvolvimento dos sistemas de produção. Assim, foram surgindo novas abordagens ao controlo da produção com o objetivo de acompanhar esta evolução, surgindo um novo foco – o controlo autónomo da produção.

Os sistemas tradicionais de controlo da produção são caracterizados por abordagens centralizadas de planeamento e controlo, o que os torna menos apropriados para lidar com a complexidade e dinâmica imposta pelos fatores acima mencionados. Isto deve-se essencialmente à falta de flexibilidade destes sistemas centralizados para se adaptarem a perturbações no ambiente de produção. Contudo, o desenvolvimento dos *Cyber-Physical Systems* (CPS), impulsionado por avanços nas tecnologias *wireless*, sensores e do poder de computação, bem como o crescimento da *Internet-of-Things* (IoT), permitiu o surgimento de um novo paradigma - os sistemas autónomos de controlo da produção ou *Autonomous Production Control* (APC). Estes são caracterizados pela capacidade de os elementos do sistema interagirem entre si e processarem informação, tendo como objetivo a tomada autónoma de decisão, com base no estado do sistema

O conteúdo desta tese, assenta sobre o estudo da performance dos métodos APC num sistema de produção dinâmico, através de um *software* de simulação (ARENA).

## 1.2 Objetivos

Este projeto incide sobre o estudo do desempenho de sistemas autónomos de controlo de produção (APC), recorrendo à simulação discreta. Os principais objetivos do trabalho são:

- Identificar os principais métodos APC propostos na literatura;
- Modelar o funcionamento de uma seleção de métodos, recorrendo a um programa de simulação;
- Estudar o comportamento destes métodos no contexto de lançamento imediato e lançamento controlado de trabalhos em produção;
- Definir implicações para a prática industrial;

## 1.3 Metodologia e estrutura do relatório

A elaboração deste trabalho segue a seguinte metodologia apresentada na Figura 1.

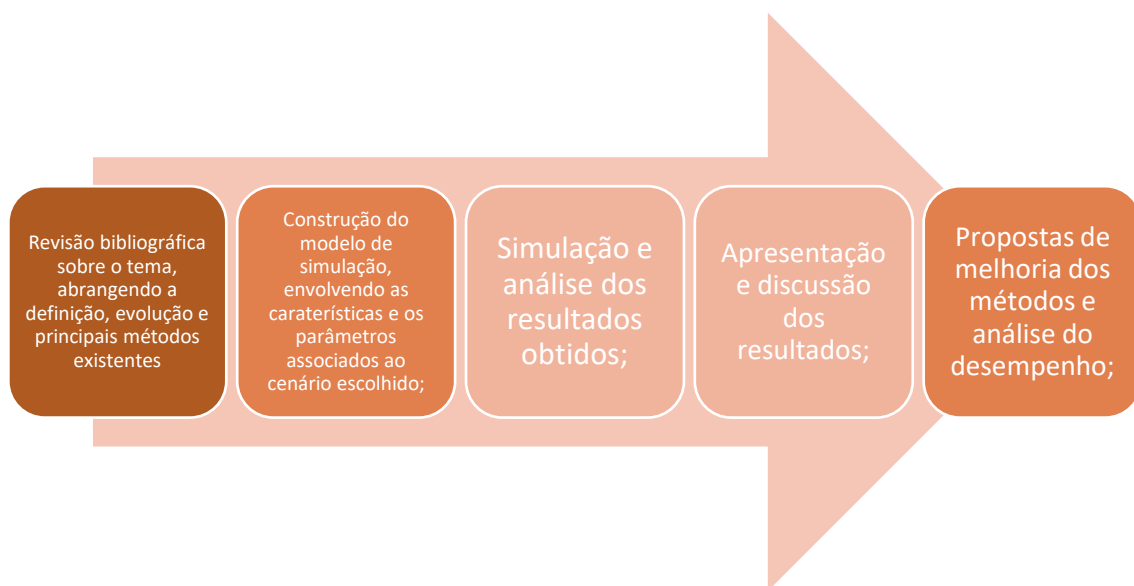


Figura 1 - Metodologia da dissertação

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema, com o objetivo de identificar os principais métodos APC e estudos realizados. No capítulo 3, é apresentado o estudo a desenvolver, o modelo de simulação, o plano experimental e as medidas de desempenho a utilizar. No capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos e implicações para a prática industrial. Por fim, no capítulo 5 apresenta-se as conclusões do estudo e propostas de trabalho futuro.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Autónomos de Controlo de Produção

2.2 Análise bibliométrica

2.3 Métodos APC

2.4 Classificação dos métodos



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas Autónomos de Controlo de Produção

A Indústria 4.0 ou quarta revolução industrial é possibilitada pela aplicação de tecnologias avançadas, nomeadamente tecnologias de informação e comunicação, ao nível da produção com o objetivo de trazer valor para o cliente e para a própria organização. O avanço destas tecnologias abriu caminho para a evolução dos sistemas de produção e as empresas têm de acompanhar estes novos desafios, de maneira a permanecerem competitivas no mercado (Khan & Turowski, 2016).

Neste contexto, os sistemas de produção necessitam de lidar com ambientes cada vez mais complexos e dinâmicos. Segundo Katja Windt & Hülsmann, (2007) isso deve-se essencialmente fatores como o mercado, o produto, a tecnologia e o processo produtivo. Na Tabela 1 são resumidos alguns desses fatores. Segundo os autores, estes fatores são impulsionadores da mudança para um novo paradigma de controlo da produção.

Tabela 1 - Novas condições e requisitos para os sistemas de produção (Katja Windt & Hülsmann, 2007)

<b>Mercado</b>	<b>Produtos</b>	<b>Tecnologias</b>	<b>Processos</b>
Heterogéneo	Ciclos de vida curtos	Computador omnipresente	Produção em rede
Curtos prazos de entrega e entrega atempada	Modificações de curto prazo	RFID; sensores	Produção baseada nas encomendas
Flutuações na procura	Elevado número de variantes	Comunicação via <i>wireless</i>	Baixos níveis de stock
Competição internacional	Lotes de tamanho reduzidos	Elementos inteligentes	Baixos custos
	Rastreabilidade		

Os sistemas tradicionais de controlo da produção são caracterizados por abordagens centralizadas de planeamento e controlo, o que os torna menos apropriados para lidar com a complexidade e dinâmica imposta pelos fatores acima mencionados. Isto deve-se essencialmente à falta de flexibilidade destes sistemas centralizados para se adaptarem a perturbações no ambiente de produção (Thomas Jagalski & Scholz-Reiter, 2008). Contudo, o desenvolvimento dos *Cyber-Physical Systems* (CPS), impulsionado por avanços nas tecnologias *wireless*, sensores e do poder de computação, bem como o crescimento da *Internet-of-Things* (IoT), permitiu o surgimento de um novo paradigma - os sistemas autónomos de controlo da produção ou *Autonomous Production Control* (APC) *systems* (Sebastian Grundstein, Freitag, & Scholz-Reiter, 2017; Roblek, Meško, & Krapež, 2016).

Os sistemas APC são caracterizados pela capacidade de os elementos do sistema interagirem entre si e processarem informação, tendo como objetivo a tomada autónoma de decisão, com base no estado do sistema (Ngxesha, Ncube, & Ma, 2019). Estes elementos são definidos como objetos logísticos inteligentes e podem incluir itens materiais (e.g. produtos, máquinas, equipamentos, veículos ou sistemas de transporte/movimentação) e imateriais (e.g. ordens de produção) (Katja Windt & Hülsmann, 2007).

Segundo Windt, Böse, & Philipp, (2008) o APC baseia-se nos três conceitos chave:

- **Tomada de decisão descentralizada**, os elementos do sistema têm a capacidade de tomar decisões de forma independente;
- **Interação**, os elementos do sistema têm a capacidade de interagir e trocar informação entre si;
- **Sistema não determinístico**, apesar de ser possível conhecer com precisão o estado do sistema e de todas as variáveis que o influenciam, não são possíveis previsões sobre o seu estado;

A simulação tem sido a ferramenta usada para explorar e comparar os sistemas autónomos de controlo de produção em relação aos sistemas convencionais ou centralizados. Na Tabela 2 são resumidos os estudos identificados que comparam os sistemas convencionais e centralizados.

Tabela 2 - Comparação entre modelos de controlo autónomo e modelos convencionais

Referência	Descrição
(B. Scholz-Reiter, Freitag, de Beer, & Jagalski, 2005)	O <i>gemba</i> adapta-se melhor às mudanças quando são aplicados os modelos de controlo autónomo. Para comprová-lo, o autor alterou a taxa de chegada dos trabalhos ao sistema e a carga dos mesmos nas máquinas (nº de número de trabalhos nas máquinas), concluindo que os métodos APC reagem melhor a estas flutuações.
(B. Scholz-Reiter, Freitag, De Beer, & Jagalski, 2005)	As estratégias de controlo autónomo são mais robustas quando sujeitas a diferentes padrões de chegada e aumento da carga de trabalho das máquinas. Estes pontos foram concluídos através da diminuição do tempo de espera nas máquinas e do tempo que um trabalho demora a percorrer o espaço fabril.
(Thomas Jagalski & Scholz-Reiter, 2008)	As estratégias de controlo autónomo foram sujeitas a diversas alterações ao nível da procura, com diferenças na taxa de chegada de trabalhos ao sistema e demonstraram que respondem melhor a estas flutuações em relação aos métodos convencionais. Resultados medidos através do TT ( <i>Throughput Time</i> )
(B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, & Mehrsai, 2009)	Neste artigo, os autores verificaram que em função dos níveis crescentes de complexidade estudados, variando a taxa de chegada de encomendas ao sistema e os intervalos de transporte, um aumento do nível de controlo autónomo melhorou substancialmente a performance do sistema.
(B. Scholz-Reiter, Görge, & Philipp, 2009)	Neste artigo, os autores verificaram que em função dos níveis crescentes de complexidade num sistema como o aumento do número de máquinas, os métodos APC comportam-se melhor quando têm de atingir uma percentagem maior de objetivos logísticos, como o <i>Throughput Time</i> , cumprimento da data de entrega, percentagem de utilização das máquinas e de trabalho em processamento.
(B. Scholz-Reiter, Rekersbrink, & Görge, 2010)	Compara heurísticas convencionais com os sistemas APC. Estes reagiram positivamente ao aumento do número de máquinas e de dinâmica, tendo conseguido melhores resultados ao nível do WIP ( <i>Work in Progress</i> ) e TPT ( <i>ThroughPut Time</i> ). Para condições estáticas, os métodos convencionais demonstraram um melhor rendimento.
(Dashkovskiy, Görge, & Naujok, 2012)	Os modelos de controlo autónomo são mais eficazes em relação a avaria de máquinas. Esta avaliação foi realizada através de uma formulação matemática e permitiram chegar a resultados de menores filas de espera e menor tempo para a normalização do ambiente produtivo depois de uma avaria.
(Mehrsai, Thoben, & Scholz-Reiter, 2014)	Os autores simularam um problema de transporte de objetos logísticos e verificaram que os métodos APC apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais, na diminuição do WIP, no aumento do número de produtos acabados, no aumento da média de trabalhos acabados ou no tempo que decorre entre a chegada do trabalho ao sistema e a sua expedição.

Apesar dos resultados assinalados nos sistemas APC acima mencionados (Tabela 2), estes também apresentam algumas desvantagens relativamente às abordagens centralizadas. Por exemplo, Dashkovskiy, Mironchenko, & Naujok, (2011), concluem com base em modelos matemáticos sobre três desvantagens destes sistemas em relação às abordagens centralizadas:

- Em sistemas de produção de dimensão reduzida, devido a um menor nível de complexidade, as estratégias de planeamento central usam o conhecimento do sistema com maior eficiência;
- Limitações ao nível da disponibilidade de informação podem resultar em perdas de eficiência dos métodos APC;
- Desconhecimento dos limites de estabilidade dos sistemas autónomos de controlo da produção;

## 2.2 Análise bibliométrica

Neste capítulo, é apresentada a metodologia para a determinação dos artigos que servem de base para a realização da dissertação.

Atendendo à crescente importância destes modelos no âmbito da Indústria 4.0, considerou-se importante abordar as seguintes questões de investigação:

- Quais os progressos realizados nesta área?
- Quem são os principais especialistas?
- Qual o tipo de artigos?

Estas questões de investigação são analisadas e respondidas neste capítulo. A base de dados para obtenção dos artigos foi a *ISI Web of Knowledge*

Várias disciplinas científicas como física, biologia, inteligência artificial, teoria de controlo e as ciências de engenharia usam o termo “*autonomous control*” (Bernd Scholz-Reiter, Rippel, & Sowade, 2011), ou seja, numa primeira fase, torna-se essencial explicar o crescente aumento de interesse da comunidade científica sobre o tema. Foi realizada uma pesquisa tendo em conta o título, o resumo e as palavras-chave dos documentos existentes na base de dados, usando o seguinte script de pesquisa:

$$TI=(autonomous\ control)$$

Esta pesquisa resultou numa amostra de 2.050 artigos, a maior parte deles encontra-se fora do âmbito do estudo, incluindo áreas como robótica, UAVs (*Unmanned aerial vehicles*), inteligência artificial, engenharia aeroespacial, etc.

O crescimento de publicações relacionadas com o tema tem crescido exponencialmente nos últimos anos (Figura 5), tendo atingido um número de 273 artigos em 2019.

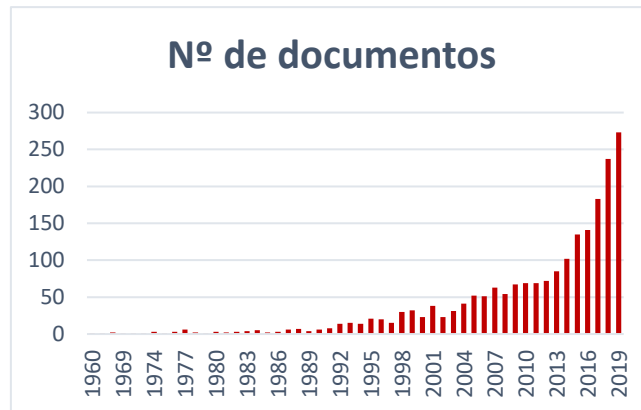


Figura 2 - Evolução do número de publicações

Em seguida, foram definidos critérios que permitam restringir a amostra a artigos com aplicação dos métodos APC a processos industriais de produção, envolvendo decisões de controlo de atividade de produção, como o lançamento, a alocação dos trabalhos a máquinas ou recursos e a sequenciação ou despacho dos mesmo nas máquinas. Assim, de forma a limitar os documentos relevantes foi realizada uma segunda pesquisa, limitando esta pesquisa apenas aos sistemas autónomos de controlo de produção.

Focando a pesquisa ao nível do conteúdo dos sistemas autónomos de controlo de produção, relevantes para a tese, chegou-se a uma amostra de 50 artigos. Foram identificados 56 autores e co-autores, sendo que os mais representativos estão apresentados na Figura 3 e Bernd Scholz-Reiter é o autor com maior número de documentos, participando em 29 deles, 58% do total. Começou a estudar o APC em 1999, quando concluiu que os sistemas tradicionais MRP não tinham flexibilidade para responder a distúrbios no ambiente de produção. 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)*.

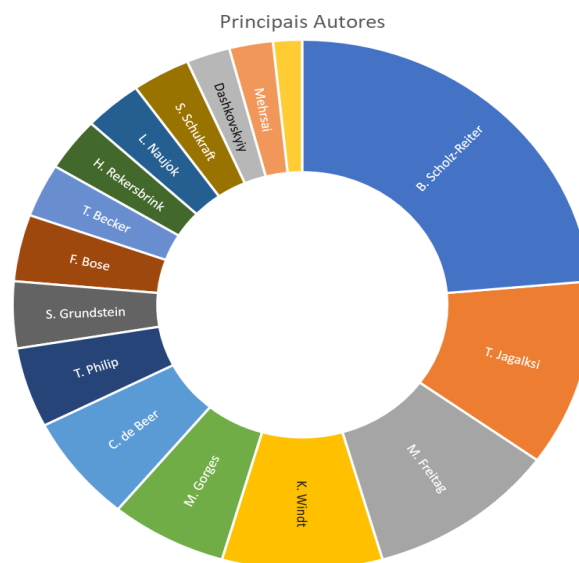


Figura 3 - Principais autores dos artigos analisados

O tipo de artigos considerado é variado (Apêndice I), podendo ser dividido em diversos tipos:

- Comparação de métodos, principalmente o PHE e QLE, tipo mais utilizado, em 44% dos artigos;
- Novos métodos;
- Controlo autónomo vs planeamento central;
- Sistemas de avaliação, que avaliam e classificam os sistemas de controlo autónomo;
- Modelos APC com novos conceitos (Tabela 3);

Tabela 3 - Tabela que representa a evolução do estudo do tema com novas variáveis

Referência	Descrição
(Bernd Scholz-Reiter, Dashkovskiy, Görge, & Naujok, 2011)	Desenvolvido um modelo matemático com o objetivo de determinar condições, que garantem a estabilidade de um sistema autónomo. Através da comparação do modelo com uma simulação desenvolvida no artigo, o autor criou os limites de estabilidade e a sua região.
(Sebastian Grundstein, Schukraft, Scholz-Reiter, & Freitag, 2015)	Realizado um estudo teórico que permite analisar o impacto dos métodos de <i>order release</i> na eficiência dos métodos de controlo autónomo.
(Sebastian Grundstein et al., 2017)	Combinação dos métodos APC com métodos de controlo como ordem de lançamento, sequenciamento e capacidade de controlo, de modo a melhorar a data de entrega. A combinação resultou e o tempo de trabalho foi poupado em 8,9% e um aumento da adesão à data de entrega de 10%.
(Sebastian Grundstein, Schukraft, Görge, & Scholz-Reiter, 2013)	Abordagem básica para potencializar a interligação entre os modelos de planeamento central e os modelos de controlo autónomo.
(S. Grundstein, Schukraft, Scholz-Reiter, & Freitag, 2015)	Foi desenvolvido um sistema de avaliação parecido ao do APC, mas neste caso para interligar os métodos convencionais e o APC. As ferramentas que avaliam a complexidade, autonomia e a obtenção dos objetivos logísticos foram adaptadas e evoluídas para permitir avaliar este sistema “híbrido”.
(Schukraft, Grundstein, Scholz-Reiter, & Freitag, 2016)	Emparelhamento dos métodos de controlo autónomo e convencionais, para medir o potencial “ <i>coupling</i> ”, ou seja, determinar a potencialidade de ligação entre estes modelos. Foram desenvolvidas ferramentas que permitem avaliar a melhor alternativa.
(Ngxesha et al., 2019)	Construída uma matriz que relaciona todos os parâmetros de complexidade apresentados por S. Grundstein et al., (2015) e que atribui ponderações a todas as variáveis.
(Gebhardt, Jeken, & Windt, 2011)	Estudo baseado num caso real de uma indústria de ferro. Analisadas diversas mudanças ao nível da alocação dos pedidos no ambiente de produção, ou seja, foi estudada a flexibilidade de um sistema. Os autores chegaram à conclusão que a aplicação de estratégias mais flexíveis e dinâmicas melhoram o desempenho do sistema, semelhante aos modelos de controlo autónomo.
(B. Scholz-Reiter & Freitag, 2007)	Desenvolvidos princípios gerais, conceitos e modelos para a aplicação dos métodos de controlo autónomos em sistemas de montagem. Não foi realizada simulação.

## 2.3 Métodos APC

### 2.3.1 Identificação dos principais métodos

Diversos métodos APC têm sido desenvolvidos. Estes atuam essencialmente ao nível da seleção da máquina que irá processar o trabalho entre diferentes máquinas alternativas (ou paralelas) e no despacho desses trabalhos em cada uma às máquinas. Estes métodos podem ser classificados em racionais, que usam abordagens estatísticas para prever estados futuros do sistema e tomar decisões ou podem ser bio analógicos, visto que transferem o comportamento de sistemas naturais como formigas ou abelhas para o controlo do sistema. A Tabela 4 resume os métodos identificados por Sebastian Grundstein et al., 2015) para cada uma destas categorias.

Tabela 4 - Métodos associados a cada tipo (Sebastian Grundstein et al., 2015)

Tipo método	Método
Métodos Racionais	<i>Queue Length Estimator (QLE)</i>
	<i>Distributed Routing Logistics Protocol (DLRP)</i>
	<i>Due Date</i>
	<i>Link-state internet routing protocol (LSIRP)</i>
	<i>One Logistics target per rule (OLTPR)</i>
	<i>Simple rule based 1</i>
	<i>Simple rule based 2</i>
Métodos bio analógicos	<i>Direct Workload (DWL)</i>
	<i>Pheromone (PHE)</i>
	<i>Ant algorithm</i>
	<i>Bacterial Chemotaxis (CHE)</i>
	<i>Bee foraging</i>
	<i>Bionic manufacturing system (BMS)</i>
<i>Holonc Manufacturing</i>	
	<i>Market based control</i>

### 2.3.2 Resumo descritivo de cada um dos métodos racionais

Neste subcapítulo, os métodos racionais apresentados na Tabela 4 são descritos:

- **Queue Length Estimator (QLE)**

Desenvolvido por J. Bendul (Katja Windt, Becker, Jeken, & Gelessus, 2010). As peças que utilizam o QLE perseguem o objetivo de diminuir o seu próprio *Throughput time* (TT) (B. Scholz-Reiter, Görge, & Philipp, 2009).

As peças comparam os níveis de carga das diferentes alternativas (máquinas paralelas) que são capazes de executar a próxima etapa de produção (sucessores diretos de acordo com o plano de produção). Os níveis de carga são calculados através do somatório dos tempos de processamento estimados das peças na respetiva máquina analisada mais o seu próprio tempo de processamento. Quando a peça precisa de tomar uma decisão sobre a sua próxima etapa, compara os níveis de carga das máquinas e escolhe a que tiver o menor tempo de espera (Thomas Jagalski & Scholz-Reiter, 2008). O método usa informação local para prever o estado futuro de um sistema, sendo através deste processo que a rota de produção de um elemento é determinada.

O QLE é o método mais avaliado, principalmente em cenários *Flexible Flow Shop* (FFS) e também num ambiente com dados de produção reais (B. Scholz-Reiter, Görge, & Philipp, 2009). Em situações com elevado número de máquinas, o método mostra um desempenho superior e constante, apesar da crescente complexidade estrutural (B. Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, et al., 2009; Philipp et al., 2003). Conclui-se que o mesmo pode ser aplicado para uma alta prioridade de redução do TT (B. Scholz-Reiter, Görge, & Philipp, 2009). Através de uma análise da sua frequência, o QLE provou ter um comportamento periódico e constante (Freitag, Beer, & Jagalski, 2007). Este método também foi testado num modelo para combinar os conceitos *lean* e *agile*, executando a tarefa de nivelar as linhas de produção e remetendo os produtos para as filas com menos tempos de espera e impedindo a existência de *bottlenecks* (Mehrsai et al., 2014).

Foi desenvolvido um sistema híbrido entre dois métodos (PHE e QLE) que incorpora os estados futuros de um sistema e experiência dos antecessores, juntando as características destas duas estratégias, mostrando um comportamento muito positivo (Bernd Scholz-Reiter & Jagalski, 2008; T Jagalski, Beer, & Freitag, 2007). O método demonstrou uma grande fiabilidade, no entanto o seu desempenho foi inferior sob alta variedade dos tempos de operação e alta carga de trabalho do sistema (Fernandes, Martins, & Carmo-Silva, 2018), assim como em situações de dinâmica inferior, alta variedade ao nível dos tempos de processamento e à medida que o número de produtos aumenta (B. Scholz-Reiter, De Beer, Freitag, & Jagalski, 2008). O QLE foi utilizado como regra de serviço e demonstrou um comportamento inferior a sistemas com a regra FIFO (Scholz-reiter, Görge, & Jagalski, 2011).

- ***Distributed Routing Logistics Protocol (DLRP)***

Desenvolvido por Wenning, Rekersbrink, & Timm-giel, (2006). Este método inicialmente criado para as redes de transporte logísticas, foi baseado nas redes de comunicação, visto que o objetivo destas é o transporte de um item de uma fonte para um destino e existem muitas rotas possíveis para este transporte, tal como nas redes de transporte logísticas. No entanto, as suas diferenças impediram uma transferência direta dos protocolos de transporte para a logística, sendo que os mesmos foram devidamente adaptados para responder aos desafios logísticos (B. Scholz-Reiter, Rekersbrink, & Freitag, 2006).

O conceito foi convertido para ambientes de produção, criando dois nomes: DLRPt e DLRPp, para transportes e produção, respetivamente. Quando uma ordem de produção entra no sistema, precisa de uma rota através de um ambiente de produção. A ordem envia uma requisição de rota para a próxima máquina, que fornece toda a informação necessária e envia a ordem para as máquinas que a podem suceder. Os passos são repetidos até que a última etapa de produção é atingida, sendo que neste ponto toda a informação é coletada pela última máquina e é transmitida, permitindo que as ordens recebam diversas alternativas de rotas através deste esquema. Depois da decisão das rotas, a ordem anuncia as novas e anula as rotas velhas, sendo que através deste procedimento, uma série de informações importantes (tempos de produção, tempos de setup, probabilidades, urgências) é transmitido para as máquinas (Rekersbrink, Scholz-Reiter, & Zabel, 2010). A Figura 4 explica o funcionamento do DLRP.

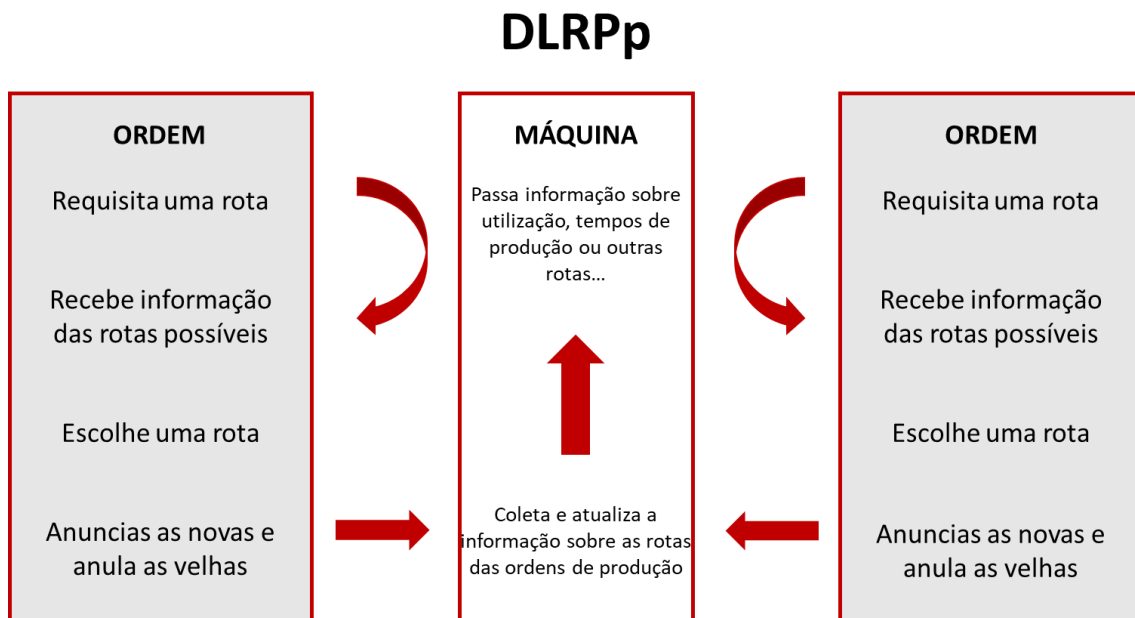


Figura 4 - Funcionamento do DLRP (Rekersbrink, Scholz-Reiter, & Zabel, 2010)

Este conceito demonstrou uma grande performance para cenários maiores e com grande dinâmica, ao contrário dos métodos heurísticos com os quais estava a ser comparado (Rekersbrink, Makuschewitz, & Scholz-Reiter, 2009; B. Scholz-Reiter et al., 2010). Num cenário FFS com três etapas de produção e duas máquinas paralelas, demonstrou capacidade de se adaptar a novos pedidos ou situações, podendo lidar com muitas tarefas logísticas diferentes (Rekersbrink et al., 2010) e simulado num terminal automóvel, foi o método com o melhor desempenho, atingindo com sucesso os objetivos de data de entrega e *Troughput Time*, demonstrando que realiza um processo completo para cada decisão (K Windt, Becker, & Kolev, 2010). Sujeito a avaria de máquinas, este método também apresentou uma boa performance equivalendo-se a métodos como QLE, LSIRP e *Holonic* (Katja Windt et al., 2010).

Em relação ao QLE, demonstrou um resultado inferior, visto que é mais fiável para situações em que as decisões têm consequências de longo alcance (B. Scholz-Reiter et al., 2010).

- ***Due Date (DD)***

Metodologia desenvolvida por J. Bendul (Katja Windt et al., 2010). O método DD baseia-se em duas etapas: a primeira é equivalente ao QLE, visto que quando um trabalho deixa uma máquina, escolhe a seguinte, comparando os níveis de carga das máquinas possíveis e escolhe a que tiver o menor nível de carga. Na segunda etapa, as datas de entrega dos trabalhos que estão em fila de espera dentro de cada máquina são comparadas e são ordenados pela data mais próxima da data atual (Freitag et al., 2007).

O conceito foi avaliado num ambiente com dados de produção reais e o comportamento foi semelhante ao do QLE, sendo indicado para diferentes objetivos e sistemas com alta prioridade de pontualidade na data de entrega (B. Scholz-Reiter, Görges, & Philipp, 2009). O *Due Date* também demonstrou um excelente desempenho quando foi estudado com ordens de lançamento planeadas, traduzindo confiança ao nível da data de entrega (Sebastian Grundstein et al., 2015).

No entanto, quando foi analisada a sua frequência através de uma onda sinusoidal, este método manifestou um comportamento caótico e uma estrutura mais complexa que o PHE e o QLE (Freitag et al., 2007).

- ***Link-State internet routing protocol (LSIRP)***

Metodologia desenvolvida no *Collaborative Research Center* (CRC) e baseia-se num conjunto de nós interligados, que numa zona de produção, representam as máquinas. Estes nós armazenam os dados de acordo com as ligações possíveis através dos protocolos de conexão de internet. Utiliza os princípios do algoritmo de Dijkstra para determinar o caminho mais curto entre duas máquinas e o percurso de uma peça num

arco que liga duas máquinas tem um custo. A relação entre o custo e o caminho mais curto permite definir a rota de cada peça. Sempre que existe alguma alteração do estado de uma máquina (avarias ou eventos imprevisíveis), a rede também tem de ser atualizada com reflexão nos custos (Katja Windt et al., 2010). Dos artigos analisados, não existem estudos em relação à performance deste método.

- **One Logistics Target Per Rule (OLTPR)**

Katja Windt et al., (2010) refere que este método foi criado pelo *Collaborative Research Center* (CRC). Este conceito consiste numa implementação de diversas regras aos trabalhos e/ou máquinas de um sistema, sendo que cada uma das regras pretende atingir um objetivo único. Pode ser facilmente estendido com novas regras para continuar a melhorar os resultados. Estas podem ser:

1. Utilização das máquinas, sendo que o sinal emitido por cada máquina é maior à medida que o nível de carga for menor;
2. Tempo de percurso, trabalhos preferem máquinas que oferecem um menor tempo de processamento;
3. Aderência às datas de entrega, ou seja, as máquinas processam os trabalhos em função das suas datas de entrega;

As diversas regras têm de ser ponderadas adequadamente para alcançar um bom desempenho (Katja Windt et al., 2010). Por exemplo, um trabalho pode escolher uma máquina com o menor nível de carga (regra 1) e a máquina sequencia os trabalhos em função das datas de entrega (regra 2). Dos artigos analisados, não existem estudos em relação à performance deste método.

- **Simple Rule Based 1 (SRB1)**

O SRB1 é muito idêntico ao QLE, ou seja, compara os níveis de carga das máquinas capazes de executar a sua próxima etapa de produção. No entanto, quando um trabalho utiliza este método não considera o seu próprio tempo de processamento para a tomada de decisão, residindo nesse ponto a diferença para o QLE. O nível de carga de uma máquina é determinado somando apenas os tempos de processamento esperados pelos trabalhos que se encontram na máquina que está a ser analisada (B. Scholz-Reiter, Freitag, de Beer, & Jagalski, 2006).

B. Scholz-Reiter, Freitag, et al., (2006) testou este método sob a influência de variações ao nível do número de máquinas e do tipo de produtos, verificando que tem uma melhor performance quando sujeito a um aumento da complexidade estrutural, ou seja, aumento do número de máquinas, reagindo melhor que o SRB2.

Este método também foi testado para numa FFS integrado com o lançamento controlado de trabalhos para a produção, demonstrado um desempenho superior ao DD e PHE (Sebastian Grundstein et al., 2015).

- ***Simple Rule Based 2 (SRB2)***

Desenvolvido por B. Scholz-Reiter, Freitag, et al., (2006), usa dados históricos para a tomada de decisão, ou seja, sempre que uma peça deixa uma máquina, deixa informação sobre a duração e o tempo de espera na respetiva máquina. As peças seguintes utilizam esses dados para decidirem a próxima etapa de produção, comparando o somatório dos tempos de processamento e dos tempos de espera de cada uma das máquinas.

Sujeito a variações ao nível do número de máquinas e do tipo de produtos, demonstrou um comportamento inferior ao SRB1. No entanto, para um maior número de classe de produtos, o seu desempenho melhorou, visto que causa um maior balanceamento, diminuindo a necessidade do produto mudar de máquina (B. Scholz-Reiter, Freitag, et al., 2006).

Estudado sobre a influência de número diferente de máquinas paralelas, número diferente de estágios produtivos e presença de avarias de máquinas, o SRB2 demonstrou um comportamento inferior aos outros métodos que estavam a ser avaliados (Katja Windt et al., 2010).

- ***Direct Workload (DWL)***

Método que será utilizado como base para o desenvolvimento do cenário desta dissertação, foi recentemente desenvolvido por Fernandes et al., (2018). Baseia-se na ideia de que o balanceamento de carga entre estágios produtivos e entre máquinas paralelas em cada um dos estágios é essencial para fazer um melhor uso dos recursos. Idêntico ao QLE, diferencia-se quando a alocação do trabalho em máquinas paralelas é realizada com base em normas de carga ou limites de carga em cada máquina. Isso significa que um trabalho é alocado uma máquina, se a carga de trabalho resultante dessa alocação não exceder o limite predefinido, caso contrário é recusado e enviado para uma fila de espera à entrada do estágio de produção. A carga de trabalho considerada é a carga direta, medida através da soma do tempo de processamento do próprio trabalho na máquina e do tempo do processamento dos que encontram em fila de espera. O menor valor desta soma, representa a máquina que será escolhida, semelhante ao QLE.

O autor Fernandes et al., (2018) simulou este método num ambiente produtivo de uma FFS e em comparação com o QLE e o PHE e demonstrou um desempenho superior para condições de níveis mais elevados de utilização do sistema, situações de elevada variabilidade na chegada de trabalho ao sistema e nos tempos de processamento

### 2.3.3 Resumo descritivo de cada um dos métodos bio analógicos

Neste subcapítulo, os métodos bio analógicos apresentados na Tabela 4 são descritos:

- **Pheromone (PHE)**

Os seus princípios foram desenvolvidos por Peeters et al., (2001). É um método inspirado em processos biológicos, procura transpor os comportamentos naturais das formigas para o controlo da atividade de produção. No caminho entre o ninho e as fontes de alimento, estes insetos emitem uma substância como forma de comunicação (feromonas). Este procedimento permite que as formigas seguintes sigam o caminho com a maior quantidade de feromonas, ou seja, o mais seguro, rápido e/ou com mais alimento (Armbruster, De Beer, Freitag, Jagalski, & Ringhofer, 2006).

Transferindo este conceito para o controlo de produção, sempre que um trabalho sai de uma máquina, ou seja, depois de cada etapa de processamento, deixa informações sobre a duração do seu tempo de processamento e tempo de espera na respetiva máquina. Os trabalhos seguintes usam esses dados para seleção da máquina com a maior concentração de feromonas no momento da tomada de decisão. A concentração evapora-se ao longo do tempo (Bernd Scholz-Reiter & Jagalski, 2008).

A probabilidade (fórmula 2) de seleção de uma máquina  $j$  num instante  $t$ ,  $P_{j(t)}$ , relaciona a concentração de feromona,  $CPHE$ , na máquina  $j$  no instante  $t$  com a concentração do número total de máquinas paralelas,  $J$ , do estágio em questão (Renna, 2010).

$$P_{j(t)} = \frac{CPHE_{j(t)}}{\sum_{j=1}^J CPHE_{j(t)}} \quad (2)$$

O  $CHE_{j(t)}$  pode ser obtido através de um alisamento exponencial (3) ou através da média móvel (4).

$$CPHE_{j(t)} = (1 - \alpha) * CPHE_{j(t-1)} + \alpha * DePHE_{jp} \quad (3)$$

$$CPHE_{j(t)} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N DePHE_{jp} \quad (4)$$

Neste caso,  $DePHE$ , representa a quantidade de feromona depositada na máquina  $j$  pelo trabalho  $p$  que acabou de ser processado,  $N$  refere-se à ordem da média móvel, ou seja, a quantidade de trabalhos que são considerados. O  $\alpha$  indica a constante de evaporação, que varia entre 0 e 1 e  $CPHE_{j(t-1)}$  representa a concentração de feromonas no instante anterior à passagem do último trabalho. O  $DePHE_{jp}$  é calculado

através do inverso do tempo de processamento,  $T_{jp}$  do trabalho  $p$  na máquina  $j$  (fórmula 5).

$$DePHE_{jp} = \frac{1}{T_{jp}} \quad (5)$$

Estas fórmulas permitem definir o efeito da evaporação da concentração de feromonas ao longo do tempo, sendo que este valor é atualizado à medida que são processados novos trabalhos nas máquinas e são acrescentadas feromonas.

O PHE foi testado em diversos cenários FFS, comparado com o QLE. Comparando estes dois métodos, o PHE demonstrou um desempenho inferior ao QLE em situações de aumento da complexidade estrutural, nomeadamente, do número de máquinas paralelas e número de estágios produtivos (Philipp et al., 2003). No entanto, para um número elevado de classe de produtos (Philipp et al., 2003) e em situações de baixa dinâmica, mas alta variação dos tempos de processamento (B. Scholz-Reiter et al., 2008), este método apresenta um desempenho superior.

Esta metodologia demonstrou ser superior aos métodos convencionais (Armbruster et al., 2006) e através da análise da sua frequência, demonstrou um comportamento periódico e constante (Freitag et al., 2007).

Renna, (2010) estudou este método num sistema com diversas células sobre o efeito de:

1. Alteração do número de operações de fabrico realizada no produto;
2. Diferentes *mix* dos produtos;
3. Perturbações internas, como avarias de máquinas;
4. Alteração do intervalo de chegada dos trabalhos ao sistema;
5. Nível de carga de um sistema;
6. Alteração do nível de dinâmica;

Este estudo conclui que o método é competitivo quando ocorrem perturbações internas e externas e ao comparar o alisamento exponencial com a média móvel, conclui que o primeiro supera o comportamento da média móvel, reagindo melhor a variações do sistema.

Apesar do PHE poder ser usado com diferentes tipos de processamento, a concentração de feromona não inclui informação sobre o tempo de *setup* de uma máquina. Para contornar este problema, diversos autores desenvolveram uma abordagem híbrida com o QLE e um fator de correção que inclui esta informação (Bernd Scholz-Reiter & Jagalski, 2008; T Jagalski et al., 2007), permitindo que tenham um desempenho superior ao método simples.

- **Ant Algorithm**

Desenvolvido por Cicirello & Smith, (2001), o seu princípio é idêntico ao do PHE, ou seja, baseia-se no comportamento biológico das formigas e na utilização de feromonas como forma de comunicação, para determinar os melhores caminhos na busca pelos alimentos. A tomada de decisão é idêntica ao PHE, mas cada tipo de trabalho tem a sua própria feromona, sendo neste ponto que os dois métodos se diferenciam. Ou seja, no momento da escolha da próxima máquina de um conjunto de máquinas paralelas, o trabalho escolhe aquela que tem a feromona do tipo de trabalho que está a ser produzido.

A probabilidade (fórmula 6) da seleção de uma máquina  $a$ , pelo tipo de trabalho  $c$ , num instante  $t$ ,  $P_{a(t)}^c$ , depende das feromonas existentes nessa máquina  $a$ , no mesmo instante  $t$ , para o tipo de trabalho  $c$ ,  $\pi_{a(t)}^c$ , onde  $M$  corresponde ao número de máquinas que são possíveis de escolher (Cicirello & Smith, 2001).

$$P_{a(t)}^c = \begin{cases} \frac{\pi_{a(t)}^c}{\sum_{a=1}^M \pi_{a(t)}^c} & (6) \\ 0 \end{cases}$$

Caso a próxima máquina, se encontre inativa o valor é 0.

O ANT foi testado por Cicirello & Smith, (2001) para variações ao nível das máquinas, estágios produtivos e tipos de trabalhos. Apesar das suas limitações (não se adequa às alterações de *mix* dos trabalhos), demonstrou ser superior aos métodos convencionais. Ao ser avaliado por Katja Windt et al., (2010) na presença de um número diferentes máquinas, estágios produtivos e avarias, demonstrou comportamento inferior aos outros métodos, juntamente com o SRB2.

- **Bacterial Chemotaxis (CHE)**

Desenhado por B Scholz-Reiter, Görge, Jagalski, & Naujok, (2010), é um método de inspiração biológica que procura transferir o comportamento da bactéria *E. Coli* para o controlo autónomo de controlo de produção. Tal como as bactérias, que detetam gradientes químicos para direcionar o seu movimento, também os objetos logísticos podem detetar alvos oferecidos por possíveis alternativas e escolher uma alternativa baseada nos princípios deste método.

Cada trabalho decide a sua rota usando um método iterativo (Figura 5), que emula um processo imaginário da bactéria *E. Coli* num espaço bidimensional.

1) definir uma posição inicial $y_0$ aleatoriamente	
Fazer enquanto $x_n < X$	
2) Determinar gradiente atual $g$ com base em $A(Y_n)$	
3) Calcular a concentração atual do $CheYp(y_n)$ a partir do gradiente $g$	
4) Determinar a probabilidade de mutação $P_k$ através de $CheYp(y_n)$	
5) gerar um número aleatório	
6) Se (número aleatório < probabilidade de mutação) então	
Se for verdadeiro	Se for falso
Gerar novo ângulo de percurso aleatório	Continuar com o mesmo ângulo de percurso
7) Determinar novo $X_n$	
8) Determinar novo $Y_n$	

Figura 5 - Algoritmo do método CHE (B. Scholz-Reiter, Görges, Jagalski, & Naujok, 2010)

Sempre que há uma tomada de decisão, o algoritmo é acionado. Inicialmente, começa por definir uma posição inicial  $y_0$  aleatória (passo 1). Em seguida, é calculado o gradiente  $g$  (fórmula 7) de acordo com a posição  $Y_n$  (passo 2).

$$g(y_n) = \frac{A(y_n)}{A(y_{n-1})} \quad (7)$$

O gradiente  $g$  é usado para calcular a concentração da bactéria  $CheYp(y_n)$  (fórmula 8) na posição  $y_n$ , sendo  $CheYp(y_{n-1})$  a concentração da bactéria na posição anterior (passo 3).

$$CheYp(y_n) = CheYp(y_{n-1}) * g(y_n) \quad (8)$$

O cálculo da concentração da bactéria permite determinar a probabilidade (fórmula 9) da troca de direção,  $P_k$ , para outra máquina paralela (mutação), onde  $k$  influencia a probabilidade e  $P_0$  é mantido constante, 0.5. Corresponde ao passo 4 do algoritmo

$$P_k(CheYp(y_n)) = \frac{1}{1 + e^{-k * CheYp(y_n) * (\frac{1}{P_0} - 1)}} \quad (9)$$

Se o valor aleatório for menor que  $P_k$  (passo 6) um novo ângulo será gerado, caso contrário, a direção atual será mantida. Este processo é repetido diversas vezes existindo várias interações, até que a distância  $X$  predefinida, seja ultrapassada.

B Scholz-Reiter et al., (2010) testaram este método num cenário de produção e estudaram a sensibilidade da função de probabilidade  $P_k$ , alterando o parâmetro  $k$ .

As decisões autónomas deste método são influenciadas pelo parâmetro  $k$  e o gradiente  $g$ . As variações ao nível do parâmetro alteram a qualidade de decisão dos objetos, assim como o comportamento dinâmico do sistema. O sistema tem um melhor desempenho para probabilidades de mutação mais suaves.

- **Bee foraging (Bee)**

Desenvolvido por (Scholz-reiter, Jagalski, & Bendul, 2008), é um método biológico inspirado no comportamento das abelhas na procura e localização das melhores fontes de alimento. Estes insetos indicam as melhores fontes de alimento através de uma dança, sendo medidas através da qualidade e quantidade, ou seja, uma dança mais longa representa uma fonte de alimento com mais qualidade (Katja Windt et al., 2010).

Transportando este conceito para um ambiente de produção, da mesma maneira que as abelhas precisam de decidir a melhor fonte de alimento, numa produção autónoma, os trabalhos têm de escolher a melhor máquina na próxima etapa de processamento. Um trabalho que sai de uma máquina deve decidir a duração do sinal devolvido ao seguinte, sendo que a escolha da máquina depende da soma dos sinais executados (número e duração dos sinais) (Scholz-reiter et al., 2008).

$$MQ_{mnk}(t) = \frac{VA_{mk} - TPT_{mnk}(t) * R}{TPT_{mnk}(t) * R} \quad (10)$$

A qualidade da fonte de alimento representa a qualidade da máquina (fórmula 10),  $MQ_{mnk}(t)$ , num contexto de produção para uma máquina  $n$ , etapa de produção  $m$  e tipo de produto  $k$ , calculado sempre que um trabalho sai de uma determinada máquina. O cálculo desta variável depende do valor acrescentado da produção em unidades monetárias  $VA_{mk}$  do produto  $k$  na etapa de produção  $m$ , e do seu custo que é dependente do tempo de percurso,  $TPT_{mnk}(t)$ , para uma máquina  $n$ , etapa de produção  $m$  e tipo de produto  $k$ . O  $R$  traduz o custo de produção por unidade de tempo.

Este método foi testado num ambiente de FFS sob a influência de tempos de *setups*, avarias de máquinas e variabilidade do tempo de chegadas. Comparado com um método convencional de controlo de produção demonstrou um desempenho superior (Scholz-reiter et al., 2008). Testado sob a influência de dados de produção reais, comprovou uma performance superior ao PHE (Bernd Scholz-Reiter, Karimi, Duffie, & Jagalski, 2011).

- ***Bionic Manufacturing System (BMS)***

Desenvolvido por Ueda, Hatono, Fujii, & Vaario, (2000), procura imitar o comportamento de duas informações biológicas: informações genéticas que evoluem ao longo de gerações (ADN) e informações adquiridas individualmente durante a vida útil de um organismo único (*BN-type*). Neste modelo, os movimentos dos trabalhos são criados usando campos de atração, máquinas, que atraem trabalhos específicos. Cada campo de atração tem um DNA, que corresponde aos tipos de trabalhos, com informações dos processos que os mesmos requerem. O BN-Type corresponde a uma regra que informa o transportador da próxima máquina a que este deverá se dirigir (Ueda et al., 2000).

- ***Holonic manufacturing (Holonic)***

De acordo com Van Brussel, Wyns, Valckenaers, Bongaerts, & Peeters, (1998), o *Holonic* foi concebido por (Márkus, Kis Vánca, & Monostori, 1996). Neste método, são definidos dois tipos de agentes: o primeiro incorpora um modelo de gestão das atividades da fábrica e o segundo, as atividades associadas à produção. Esses agentes são denominados de unidade central de gestão e máquinas/recursos, respetivamente.

O objetivo geral de um sistema de produção é o lucro. O lucro de uma unidade central é o pagamento recebido pelos clientes externos que realizam os pedidos menos a soma dos pagamentos realizados às máquinas para trabalhar nos pedidos. O lucro de uma máquina é a diferença entre o pagamento da unidade central e o seu custo tecnológico. Os rendimentos próprios de cada um dos agentes definem o seu desempenho.

Os clientes externos enviam pedidos para a unidade de gestão com prazos e condições financeiras. Quando estes pedidos são aceites, um trabalho é criado e comunicado aos recursos do sistema. As máquinas realizam ofertas e terão de ser negociadas e bem ponderadas pelo controlador, visto que trabalhos concluídos com atraso são penalizados. Contudo, se não forem realizadas ofertas, um mecanismo de penalização é ativado, que consiste na aplicação de penalizações aos recursos, que são capazes de produzir os trabalhos, obrigando as máquinas a realizar ofertas, já que o objetivo destas é maximizar o lucro (Márkus et al., 1996).

O conceito foi estado sob influência de diferente número de máquinas, de estágios produtivos e avarias de máquinas, num ambiente FFS e o seu desempenho coincidiu com o LSIRP, DLRP e QLE, sendo superior ao ANT e SRB2 (Katja Windt et al., 2010). A alteração da atribuição dos custos/preços do sistema pode alterar o desempenho do sistema e pode ocorrer um conflito entre os objetivos individuais dos recursos e o objetivo geral do sistema (Márkus et al., 1996).

- **Market based control (Market)**

Método projetado pelo *Collaborative Research Center (CRC)* (Katja Windt et al., 2010). Uma moeda virtual é introduzida para permitir as trocas monetárias entre as máquinas e os trabalhos. A cada trabalho lançado em produção é associada uma “lista de compras” que corresponde às operações de processamento necessárias, cada uma com um orçamento associado. Os trabalhos realizam ofertas às máquinas (capazes de realizar as operações de processamento) com menores custos de produção e, tendo em conta, o custo da distância percorrida. Na possibilidade de existirem diversos trabalhos a concorrer para a mesma máquina, esta tem o poder de escolher o trabalho com a maior oferta (Katja Windt et al., 2010).

No entanto, a dificuldade na atribuição de custos de produção aos trabalhos e de custos de produção impede que existam mais estudos para medir o comportamento desta metodologia (Katja Windt et al., 2010).

## 2.4 Classificação dos métodos

Os diferentes métodos apresentados na secção anterior foram classificados consoante as suas características, Figura 6 (Katja Windt et al., 2010).

		MÉTODOS APC													
		Métodos racionais							Métodos bio analógicos						
Dimensões	Atributos	QLE	DLRP	DD	LSIRP	OLTPR	SRB1	SRB2	PHE	ANT	CHE	BEE	BMS	Holonic	Market
Dados temporais	Passado (Pass) Futuro (Fut) Mista (Mix)	Fut	Pass	Fut	Pass	Mix	Fut	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Mix	Fut	Pass
Etapas de planeamento	1 2 3 4+	1	4+	1	4+	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1
Valores Artificiais	Não utiliza (Não) Estático (Esta) Dinâmico (Dina)	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Dina	Dina	Dina	Esta	Dina	Dina	Dina
Tipos de comunicação	Trabalho - Máquina (Tra - Máq) Trabalho - Trabalho (Tra - Tra) Máquina - Máquina (Máq - Máq) Central (Cen)	Tra - Máq	Máq - Máq; Tra - Máq	Tra - Máq; Tra - Tra	Máq - Máq; Cen	Tra - Máq; Tra - Tra	Tra - Máq	Tra - Máq	Tra - Máq	Tra - Máq	Tra - Tra; Tra - Máq	Tra - Tra; Tra - Máq	Tra - Tra; Tra - Máq	Cen; Máq - Máq	Tra - Máq; Cen
Complexidade utilizada	Baixo (1-2) Médio (3-5) Alto (5 ou mais)	Baixo	Alto	Médio	Alto	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Alto
Decisor	Trabalho (Tra) Máquina (Máq) Central (Cen)	Tra	Tra; Máq	Tra	Máq	Tra; Máq	Tra	Tra	Tra	Tra	Tra	Tra	Tra	Máq; Cen	Tra; Máq; Cen
Armazenamento de dados	Trabalho (Tra) Máquina (Máq) Central (Cen)	Máq	Máq	Tra; Máq	Máq; Cen	Tra; Máq	Máq	Máq	Máq	Máq	Tra; Máq	Máq	Máq	Máq; Cen	Tra; Máq; Cen

Figura 6 - Classificação dos métodos APC (adaptado de Katja Windt et al., (2010))

A classificação dos métodos realizada por Katja Windt et al., (2010), baseia-se em 7 dimensões:

1. **Dados temporais**, indica se o método usa dados do passado, futuro ou mistos para a tomada de decisão;
2. **Etapas de planeamento**, ou seja, o número de etapas de produção futuras que o método considera após a tomada de decisão;
3. **Valores artificiais**, representa a criação de valores artificiais (e.g. feromonas) para a tomada de decisão ou a utilização de variáveis não artificiais;
4. **Tipos de comunicação**, indica como é feita a comunicação entre os objetos logísticos e/ou entre os objetos logísticos e uma eventual unidade central;
5. **Complexidade utilizada**, número de variáveis usadas na tomada de decisão;
6. **Decisor**, representa quem toma a decisão – objetos ou unidade central;
7. **Armazenamento de dados**, traduz a localização do armazenamento de dados;

Em função destas dimensões, o autor criou um grau de semelhança,  $S^{kl}$ , que permite comparar dois métodos,  $k$  e  $l$ . Para cada uma das dimensões, foi criada uma matriz que permite medir o nível de semelhança na dimensão a ser estudada. Por exemplo, para os dados temporais, a matriz é determinada na Tabela 5, sendo que dois métodos com tomadas de decisão baseadas em dados passados são similares.

Tabela 5 - Representação da matriz de similaridade para os dados temporais

	Passado	Híbrido	Futuro
Passado	1.0	0.5	0
Híbrido		1.0	0.5
Futuro			1.0

Este processo foi repetido para as restantes dimensões e no final, todos os graus foram somados. O autor avaliou e comparou 13 métodos segundo este modelo (excepto CHE e DWL), tendo chegado a valores percentuais que determinam o grau de semelhança (Figura 7).

PHE	BEE	SRB1	SRB2	QLE	DD	OLTPR	Market	Holonic	LSIRP	DLRP	
79	82	71	86	71	56	58	63	36	32	49	ANT
	82	79	93	79	77	80	56	29	54	70	PHE
		61	75	61	67	69	60	32	36	52	BEE
			86	100	85	73	35	36	32	49	SRB1
				86	70	73	49	21	46	63	SRB2
					85	73	35	36	32	49	QLE
						88	43	35	31	48	DD
							55	32	43	60	OLTPR
								63	50	50	Market
									54	37	Holonic
										83	LSIRP

Figura 7 - Grau de semelhança entre os métodos (Katja Windt et al., 2010)

Todos os métodos com semelhança igual ou acima de 71% pertencem ao mesmo grupo, sendo que possuem 5 dimensões semelhantes nas 7 totais. Logo, o autor definiu 4 grupos:

- **Grupo 1:** ANT, BEE, PHE e SRB2;
- **Grupo 2:** SRB2, PHE, SRB1, QLE, OLTPR;
- **Grupo 3:** PHE, SRB1, QLE, OLTPR, DD;
- **Grupo 4:** LSIRP, DLRP;

O *Market* e o *Holonic* não se enquadram em nenhum dos grupos, tendo em conta as suas propriedades distintas;

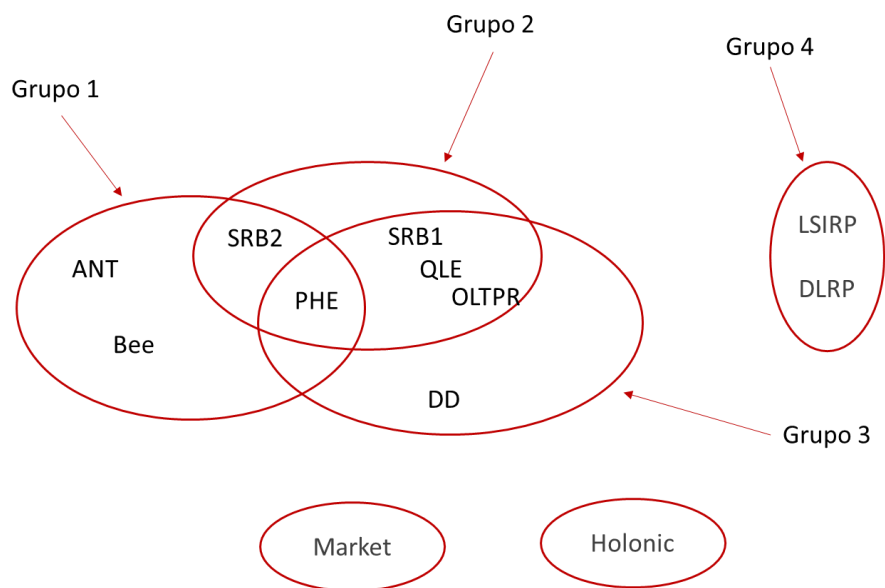


Figura 8 - Divisão dos métodos em Grupos (Katja Windt et al., 2010)



# 3. MODELO DE SIMULAÇÃO

- 3.1 Sistema de produção
- 3.2 Descrição do modelo
- 3.3 Plano experimental e medidas de desempenho



### 3 MODELO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo, é descrito o cenário de simulação escolhido, envolvendo as suas características e parâmetros. Com o objetivo de avaliar os sistemas autónomos de controlo de produção, as propriedades do modelo serão detalhadas (subcapítulo 3.1), tais como, os métodos usados (QLE, PHE e DWL), as regras de sequenciação (FCFS e EDD) e a limitação do número de trabalhos lançados no sistema, subcapítulo 3.2. Por último, é identificado o plano experimental e as medidas de desempenho consideradas, no subcapítulo 3.3

Após toda a caracterização e apresentação dos parâmetros envolvidos no sistema, os fatores e níveis de experimentação são relacionados e os métodos APC serão avaliados em função da alteração das regras de sequenciação, lançamento controlado de trabalhos no sistema e limitação do nível de carga nas máquinas (no caso do DWL). O impacto destas alterações é estudado e os resultados são apresentados.

#### 3.1 Sistema de produção

O sistema de produção modelado consiste numa configuração *Flexible Flow Shop* (FFS), com três estágios de produção (1, 2 e 3). Cada estágio contém três máquinas paralelas (A, B e C) para a produção do produto, totalizando um total de 9 máquinas. O fluxo é unidirecional e cada trabalho tem três operações, uma em cada estágio.

O fluxograma (Figura 9) demonstra o percurso de cada trabalho na área de produção. Neste cenário, existe um total de 27 (3 x 3 x 3) rotas possíveis

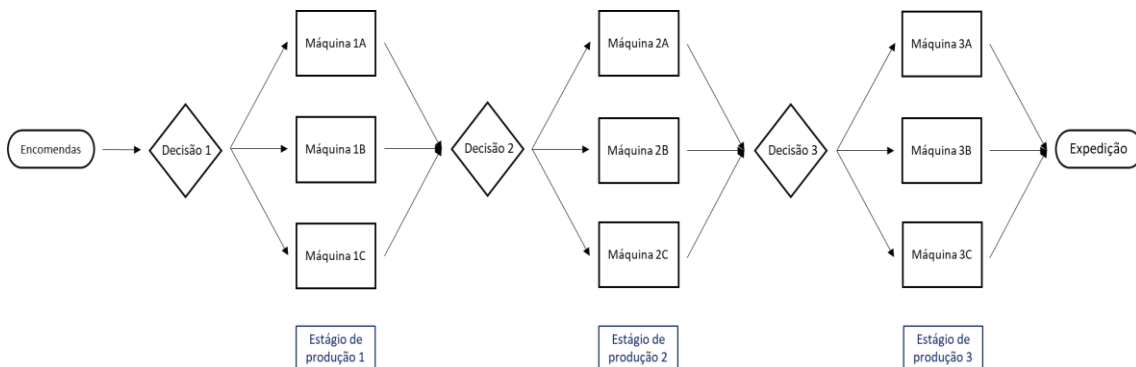


Figura 9 - Fluxograma que descreve o percurso do trabalho no sistema

Antes de cada um dos estágios de produção, encontra-se um mecanismo de decisão que permite ao trabalho selecionar a máquina no qual o processamento vai ocorrer, em função do método APC específico usado e do estado do sistema de produção no momento da decisão.

As máquinas diferem nas suas características operacionais, nomeadamente no que se refere ao tempo de processamento para executar uma determinada operação. Existem três tipos de produtos (a, b e c) em produção, cada um com uma máquina “preferencial” em cada um dos estágios. Ou seja, o produto pode ser produzido em menos tempo na máquina preferencial. Os tempos de processamento de cada produto em cada máquina e em cada estágio estão indicados na Tabela 6. O produto do tipo a tem o menor tempo de processamento nas máquinas A (ao longo dos diversos estágios de produção), o tipo de produto b nas máquinas B e o tipo de produto c nas máquinas C.

Tabela 6 - Tempos de processamento atribuídos nas máquinas

Tipo de produto	Máquina 1A, 2A e 3A	Máquina 1B, 2B e 3B	Máquina 1C, 2C e 3C
a	2.0	3.0	2.5
b	2.5	2.0	3.0
c	3.0	2.5	2.0

Foram ainda considerados os seguintes pressupostos:

- Todos os materiais requeridos e informações necessárias para a produção dos produtos encontram-se disponíveis no momento da chegada de trabalho ao sistema;
- A capacidade das máquinas é igual e constante ao longo do tempo;
- As distâncias e tempos de transporte entre estágios de produção são considerados negligenciáveis;
- Os tempos de *setup* estão incluídos nos tempos de operação;
- o grau de *Interchangeability* das máquinas de um dado estágio é de 100%, ou seja, os produtos podem ser produzidos em qualquer das máquinas ainda que com tempos diferentes como acima indicado;

A Tabela 7 resume as características do sistema de produção em estudo.

Tabela 7 - Características gerais do sistema

Atributos dos trabalhos e do sistema	Valores
Tipo de configuração	FFS
Número de estágios de produção	3
Máquinas por estágio	3
Capacidade das máquinas	Constante ao longo do tempo
Número de operações por trabalho	3
Grau de <i>Interchangeability</i>	100%

### 3.2 Descrição do modelo

Neste subcapítulo é apresentado o modo como o sistema de produção é desenvolvido no software ARENA. Com o objetivo de controlar o fluxo dos trabalhos em produção, foram utilizados métodos autónomos de controlo de produção (APC), responsáveis pela seleção da máquina, em cada estágio. Ao nível de cada uma das máquinas os trabalhos são processados de acordo com a regra de despacho, a qual é responsável por sequenciar (i.e., ordenar) os trabalhos em fila de espera. Além destas decisões de controlo do fluxo de materiais, foi ainda introduzido a decisão de lançamento de trabalhos em produção. Para tal é usado um mecanismo do tipo CONWIP que limita o número de trabalhos no sistema. Esta decisão de lançamento é precedida por uma decisão de sequenciação dos trabalhos para lançamento baseada numa regra de sequenciação da *pool* (i.e. dos trabalhos que aguardam lançamento).

Os trabalhos são criados em três *Create*, um para cada tipo de produto, sendo que cada um deles está ligado a um *Assign*. Neste processo são criadas as encomendas e a diferença de tempo entre encomendas é determinado pela expressão  $1/0,36$ . As ligações entre o *Assign* e o *Create* estão demonstradas na Figura 10.

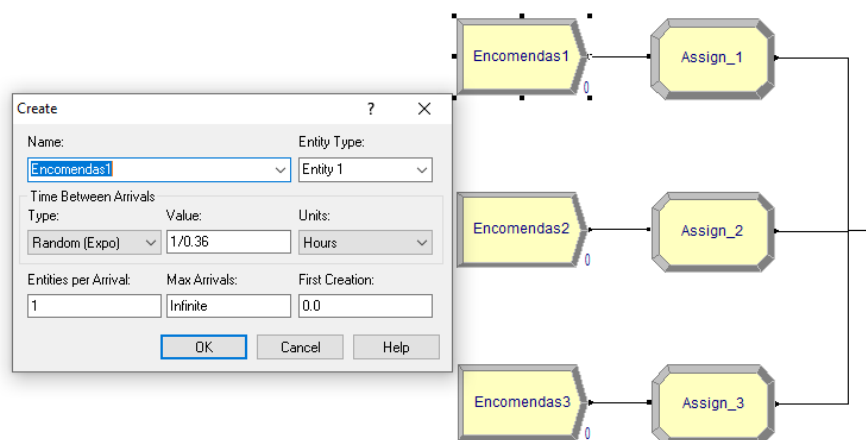


Figura 10 - Representação da criação dos trabalhos

O processamento dos trabalhos no modelo de simulação é feito num *Process*, tal como indicado na Figura 11. Apesar do método estar indicado para apenas uma das máquinas, a sua aplicação segue os princípios de acordo com a Tabela 6.

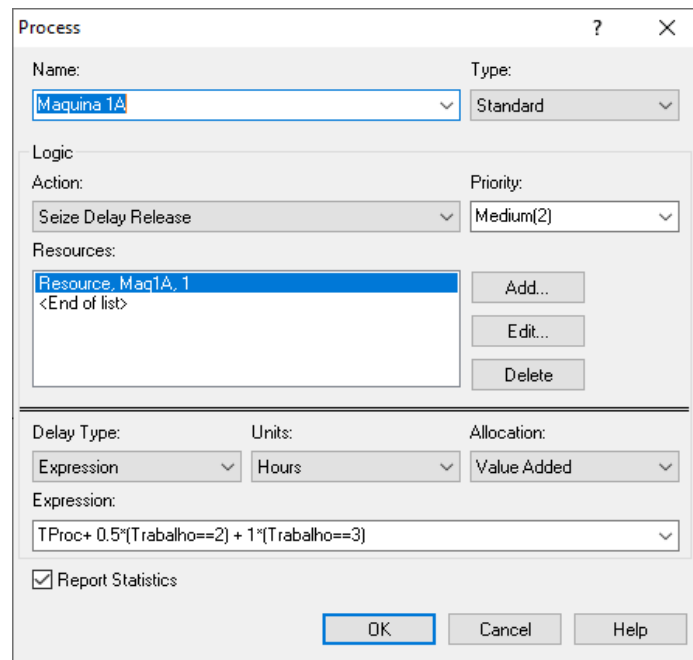


Figura 11 - Aplicação dos tempos de processamento nas máquinas

### 3.2.1 Métodos APC

Para a devida simulação, foram usados os seguintes métodos APC: QLE, PHE, DWL e RANDOM. O método RANDOM, é usado como base de comparação de desempenho, onde os trabalhos escolhem a máquina de forma aleatória, com igual probabilidade. Os métodos QLE e PHE foram escolhidos pela sua simplicidade de funcionamento e o DWL pelo bom desempenho demonstrado (Fernandes et al., 2018).

No caso do método QLE, tal como descrito no ponto 2.3.2, quando uma peça precisa de tomar uma decisão sobre a sua próxima etapa, compara os níveis de carga nas máquinas e escolhe a que tiver o menor tempo de espera. Estes níveis de carga são calculados através dos tempos de processamento dos trabalhos que se encontram em fila de espera da máquina ao qual é adicionado o tempo de processamento do próprio trabalho. No software ARENA, são utilizados dois *Assigns* para manter atualizada a carga em cada uma das 9 máquinas: *Assign\_Entrada* e *Assign\_Saída* (Figura 12).

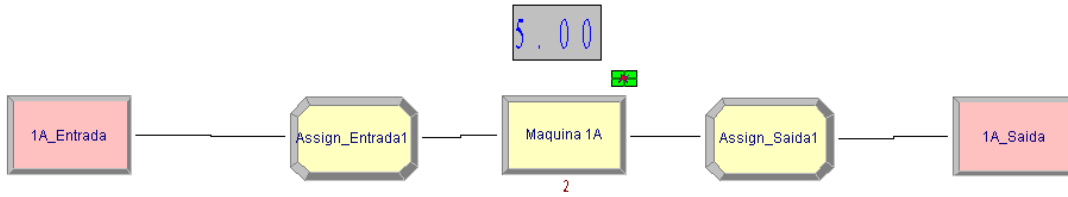


Figura 12- Representação do processamento dos trabalhos nas máquinas (método QLE)

No primeiro *Assign* é incrementado o nível de carga como ilustrado na Figura 13, assim que um trabalho chega à máquina. O tempo de processamento é o mesmo utilizado nas máquinas e explicado no ponto 3.1. O segundo *Assign* decrementa a carga da máquina sempre que o trabalho sai da mesma (Figura 14).

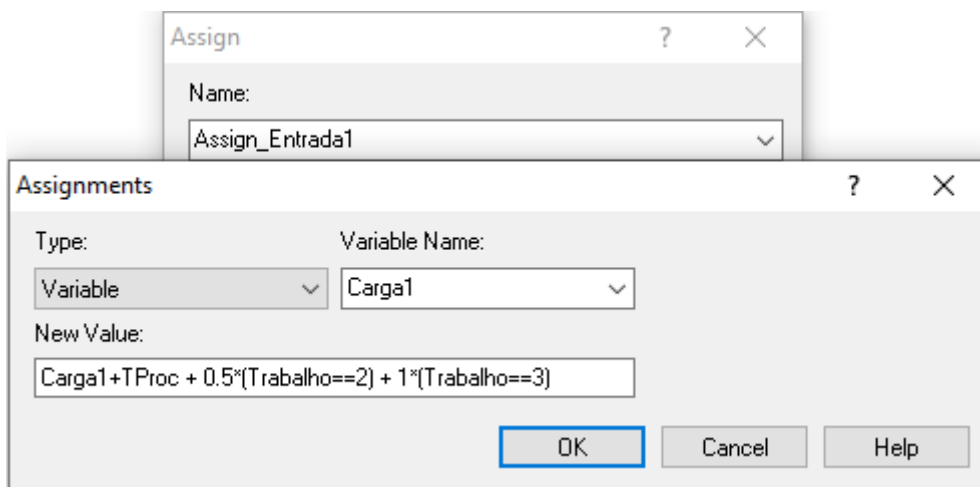


Figura 13 – Representação do incremento do nível de carga na máquina (*Assign* Entrada)

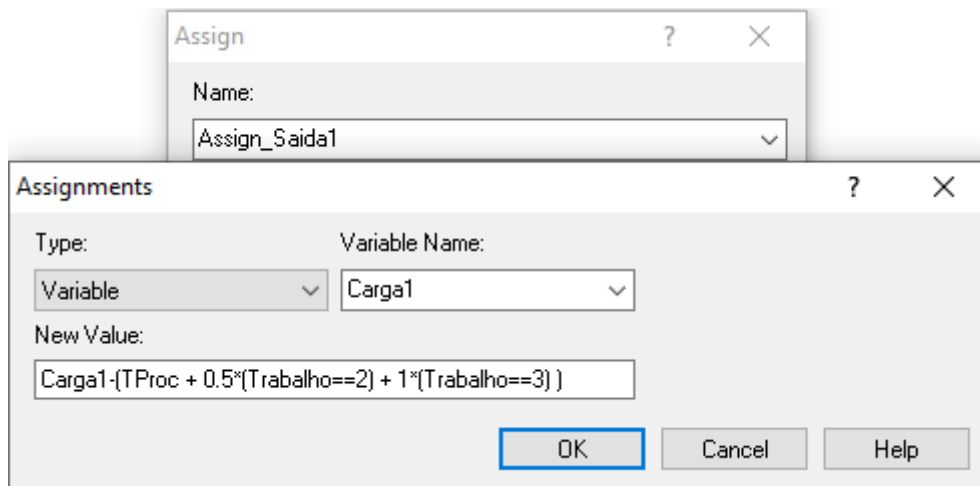


Figura 14 – Representação do decremento do nível de carga na máquina (*Assign* Saída)

Quando o trabalho é reencaminhado para uma máquina, se esta estiver ocupada, as peças são colocadas na fila de espera, sendo este tempo de espera somado ao que está em processamento, completando o nível de carga total. Quando a peça avança, o tempo é subtraído e outra (em fila) avança para o processamento.

Neste método, o trabalho decide a máquina a visitar através de um *PickStation* tal como ilustrado na Figura 15, ou seja, a sua decisão é tomada com base nas expressões, e seleciona a máquina com o nível de carga mais baixo no momento da decisão.

Toda a representação de um estágio produtivo no QLE está no Apêndice II.

Figura 15 - Representação da decisão no QLE

O método DWL (*Direct Workload*) é muito semelhante ao QLE, mas diferencia-se no momento da alocação de um trabalho nas máquinas, sendo realizado com base em normas ou limites de carga, ou seja, o trabalho só é alocado a uma máquina se a carga resultante dessa operação não exceder o limite predefinido. Os níveis de carga e a tomada de decisão são realizados de maneira idêntica ao QLE, demonstrado nas figuras 13, 14 e 15. No modelo, a diferenciação é expressa na forma de um *Decide* (Figura 16) colocado previamente ao *Assign\_Saída* que permite definir um limite de carga (*Maximo1*), em horas. Sempre que este limite nas máquinas for excedido, os trabalhos são reencaminhados para as filas de espera antes do *Pickstation* de cada estágio, como ilustrado na Figura 17.

Toda a representação de um estágio produtivo no DWL está no Apêndice III.

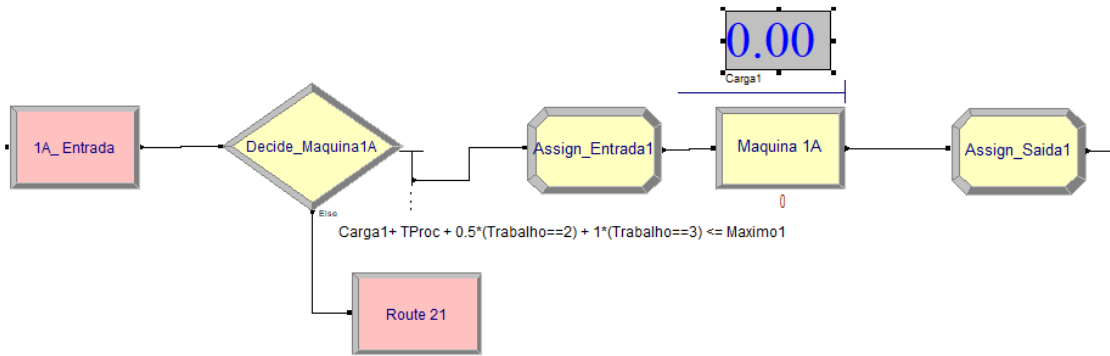


Figura 17 - Representação do momento de decisão em função do limite de carga no método DWL

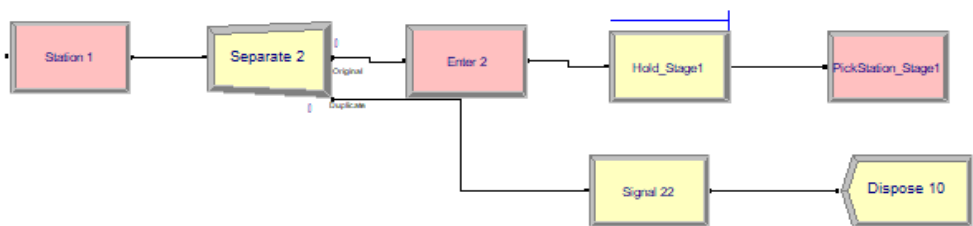


Figura 16 - Fila de espera antes de cada estágio de produção

No método PHE, explicado no ponto 2.3.3, sempre que um trabalho sai da máquina, deixa informação sobre o tempo que passou em processamento e em espera nessa máquina. A tomada de decisão neste caso é efetuada com base na máquina com a maior concentração de feromonas no momento da tomada de decisão, onde a concentração de feromona em cada máquina é obtida como ilustrado na figura 18 que implementa a fórmula (3).

Na simulação, a fórmula usada para realizar a evaporação das feromonas é a fórmula (3). Neste cenário, só é utilizado o *Assign\_Saida* com o propósito de quantificar a concentração da feromona (Figura 18). Relacionando a fórmula com o modelo no ARENA, o *CPHE*, concentração da feromona, representa a variável *C1* (*C2* até ao *C9* para os outros estágios de produção) e a constante de evaporação  $\alpha$  simboliza o *factore*, sendo este valor de 0.5, ponderação idêntica da concentração da feromona existente e da depositada pelo último trabalho. O *DePHE*, quantidade de feromona depositada pelo trabalho que acabou de ser processado é calculado pelo inverso do *TT*, *throughput time*. De forma a obter valores não nulos no arranque da simulação foi necessário definir uma concentração inicial das feromonas em cada máquina, tendo sido atribuído o valor 0.5.

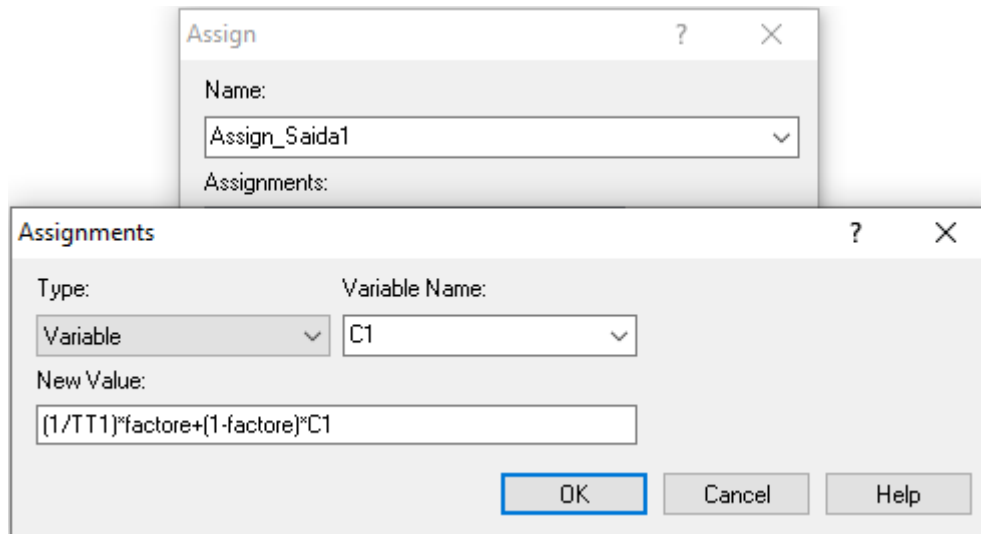


Figura 18 - Representação da fórmula (3) no método PHE

A tomada de decisão segue uma base probabilística, refletida na fórmula (2). A probabilidade da seleção de uma máquina relaciona a concentração da feromona desta com as restantes concentrações das 3 máquinas do estágio de produção. No cenário, é usado um *PickStation* com a função de calcular as probabilidades e encaminha os trabalhos para um dos ramos do estágio, consoante a maior probabilidade no momento da tomada de decisão (Figura 19).

No entanto, sempre que existem máquinas sem trabalhos em filas de espera, a seleção só incide sobre as máquinas que se encontram disponíveis, visto que se trata de uma característica probabilística e o trabalho poderia escolher uma máquina ocupada ao invés de uma desocupada. Por isso, alterou-se a fórmula (2) e foi adicionada uma variável binária,  $bm$ , tomando o valor de 0 se a máquina estiver em funcionamento e 1 se estiver vazia (fórmula 11).

$$P_{jt} = P_{jt} * bm \quad (11)$$

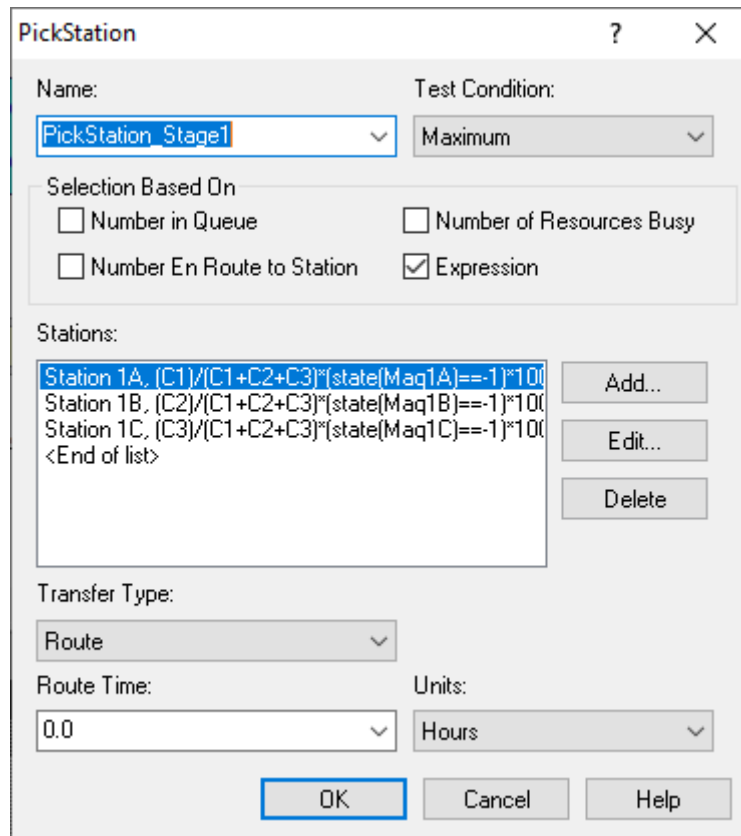


Figura 19 - Representação da decisão no PHE

Toda a representação de um estágio produtivo no PHE está no Apêndice IV.

### 3.2.2 Regras de despacho

As regras de despacho definem a forma pela qual os trabalhos em fila de espera de cada máquina são selecionados, definindo próximo trabalho a ser processado quando a máquina fica livre. Neste âmbito serão consideradas as seguintes regras:

1. FCFS (*First Come First Served*)
2. EDD (*Earliest Due Date*)

O FCFS sequencia os trabalhos consoante o momento em que estes se associaram à fila de espera, ou seja, os primeiros a chegar são processados em primeiro lugar. O EDD ordena os trabalhos de acordo com as datas de entrega, sendo que os trabalhos em fila de espera com a data de entrega mais próxima são processados em primeiro lugar. Estas duas regras são avaliadas no plano experimental considerado.

### 3.2.3 Lançamento controlado de trabalhos no sistema

No modelo foi adicionada a decisão de lançamento, a qual limita o número de trabalhos no espaço fabril, antes do 1º estágio de produção. O limite é definido num *Decide* que permite o lançamento de trabalhos até um certo valor, denominado por “Maximo”. Assim caso o número máximo de trabalhos no espaço fabril não exceda o limite estabelecido, o trabalho será lançado, caso contrário é retido numa *pool*, modelada através de um *Hold* (Figura 20), onde aguarda até que número de trabalhos no espaço fabril se altere. Para tal sempre que um trabalho acaba o seu processamento no espaço fabril e sai é enviado um sinal para o *Hold*, no sentido de libertar os trabalhos que aí se encontram, para uma nova avaliação de quais poderão ser lançados. Os trabalhos que se encontram nesta *pool* são sequenciados de acordo com as regras seguintes: .

1. FCFS (*First Come First Served*)
2. EDD (*Earliest Due Date*)

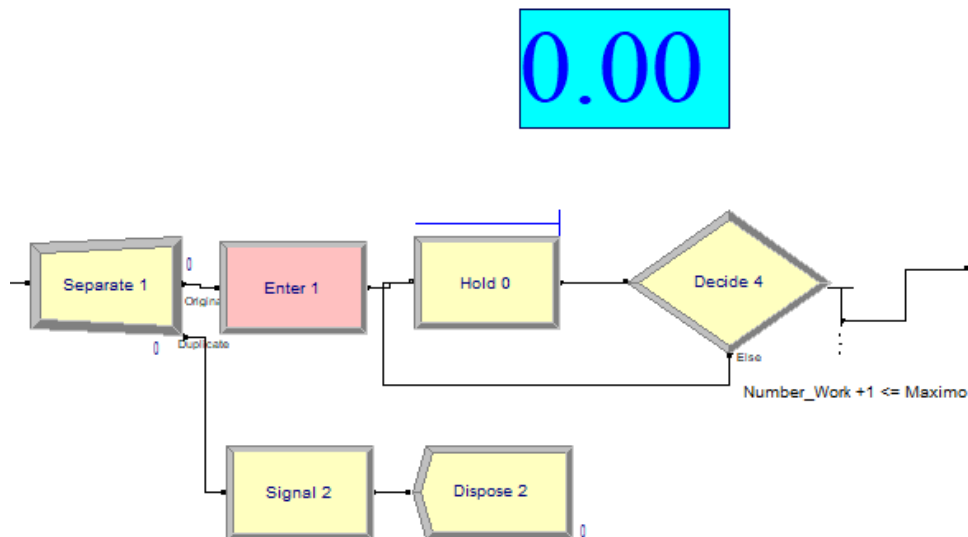


Figura 20 - Demonstração do sistema de gestão de número de trabalhos no sistema

### 3.3 Plano experimental e medidas de desempenho

Com o objetivo de simular o comportamento do sistema, os fatores de experimentação foram testados a diferentes níveis e combinados de forma a criar diferentes situações produtivas. Assim, os métodos APC, as regras de sequenciação na *pool* para lançamento, as regras de despacho e limite de trabalhos no espaço fabril foram testados nos níveis a seguir indicados:

- Métodos APC, testados a 4 níveis: QLE, PHE, DLW e RANDOM;
- Regras de despacho nas filas de espera das máquinas, testadas 2 níveis: EDD e FCFS;
- Regras de sequenciação na *pool*, testadas 2 níveis: EDD e FCFS;

- Limite de trabalhos no espaço fabril, testado a 4 níveis: 12, 15, 18 e infinito;

No caso do método DWL é ainda necessário definir o limite de carga nas máquinas (Tabela 8). Este foi testado a 4 níveis, tal como ilustrado na tabela seguinte, de acordo com o limite de trabalhos no espaço fabril.

Tabela 8 - Limite de carga nos estágios de produção (DWL)

Nível	Limite trabalhos	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
		Limite (h)	Limite (h)	Limite (h)
1	12	4	4	4
2	15	5	5	5
3	18	6	6	6
4	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Isto resulta num plano experimental (Figura 21) de 64 cenários (4x4x2x2).

Fatores	Níveis de experimentação			
Métodos APC	QLE	PHE	DWL	RANDOM
Regras de sequenciação ( <i>pool</i> )	FCFS	FCFS	FCFS	FCFS
	EDD	EDD	EDD	EDD
Regras de despacho (Máquinas)	FCFS	FCFS	FCFS	FCFS
	EDD	EDD	EDD	EDD
Lançamento controlado de trabalhos no sistema (nº trabalhos)	12	12	12	12
	15	15	15	15
	18	18	18	18
	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Figura 21 - Plano experimental

Os resultados para cada cenário foram recolhidos para um tempo de simulação de 13000 horas, com um período de aquecimento (*warm up*) de 3000 horas e 100 replicações independentes. Neste estudo foram usadas as 6 medidas de desempenho seguintes:

1. TT – Tempo no espaço fabril;
2. TTT – Tempo total no sistema;
3. Percentagem de trabalhos em atraso;
4. *Lateness*;
5. *Tardiness*;

O TTT (*Total ThroughputTime*) ou Tempo Total no Sistema em português, representa o tempo decorrido entre a chegada do trabalho ao sistema e a sua expedição (entrega ao cliente). O TT (*ThroughputTime*) ou tempo no espaço fabril, representa o tempo entre o lançamento em produção e a expedição. A Percentagem de trabalhos em atraso,  $PT_{Atraso}$ , indica a percentagem de trabalhos que concluíram o seu processamento após a data de entrega devida. A fórmula (12) relaciona o número de trabalhos em atraso,  $NT_{Atraso}$  e o número de trabalhos sem atraso,  $NT_{SemAtraso}$  para determinar esta percentagem.

$$PT_{Atraso} = \frac{(NT_{Atraso})}{(NT_{Atraso}) + (NT_{SemAtraso})} * 100 \quad (12)$$

No modelo, um *Decide* compara o tempo decorrente da simulação com a Data de Entrega definida e verifica se o trabalho está atrasado ou não (Figura 21). Caso a Data de Entrega seja superior ou igual ao Tempo de decorrente de simulação (TNOW), os trabalhos são considerados sem atraso e são incrementados num contador, sendo os restantes considerados trabalhos em atraso. Os números servem para calcular a percentagem de trabalhos em atraso (Fórmula 12).

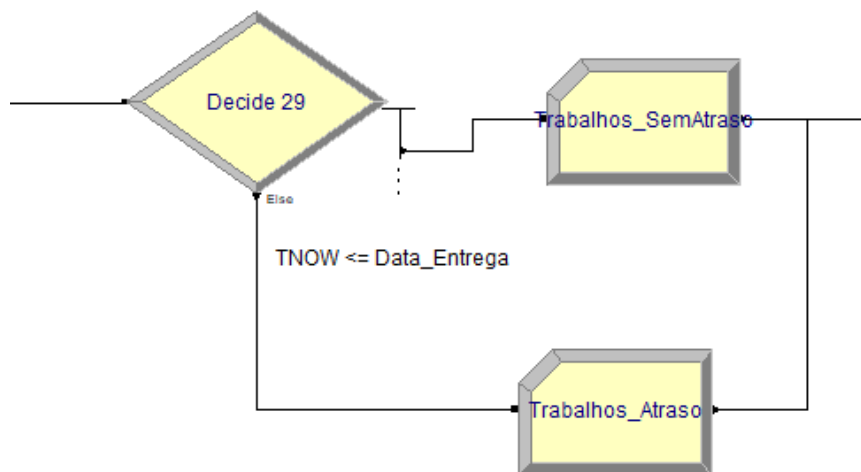


Figura 22 - Verificação dos atrasos dos trabalhos

A *Lateness*  $Lp$  regista o valor de atraso dos trabalhos, pode ser positivo (trabalhos entregues com atraso), zero (trabalhos entregues na data acordada) e negativo (trabalhos entregues antes da data de entrega). No cálculo da fórmula (13) o  $DEp$  representa a data de entrega devida e  $Cp$  a data de conclusão.

$$Lp = Cp - DEp \quad (13)$$

O *Tardiness*,  $Tp$ , mede a média de atrasos positivos e é obtido pela seguinte fórmula (14).

$$Tp = \max\{Cp - DEp; 0\} \quad (14)$$





## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

- 4.1 Cenário Base: Impacto dos métodos APC no desempenho do sistema
- 4.2 Impacto da alteração das regras de sequenciação das filas de espera nas máquinas para despacho
- 4.3 Impacto da alteração das regras de sequenciação na *pool* para lançamento em produção
- 4.4 Análise de sensibilidade
- 4.5 Análise do melhor cenário



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

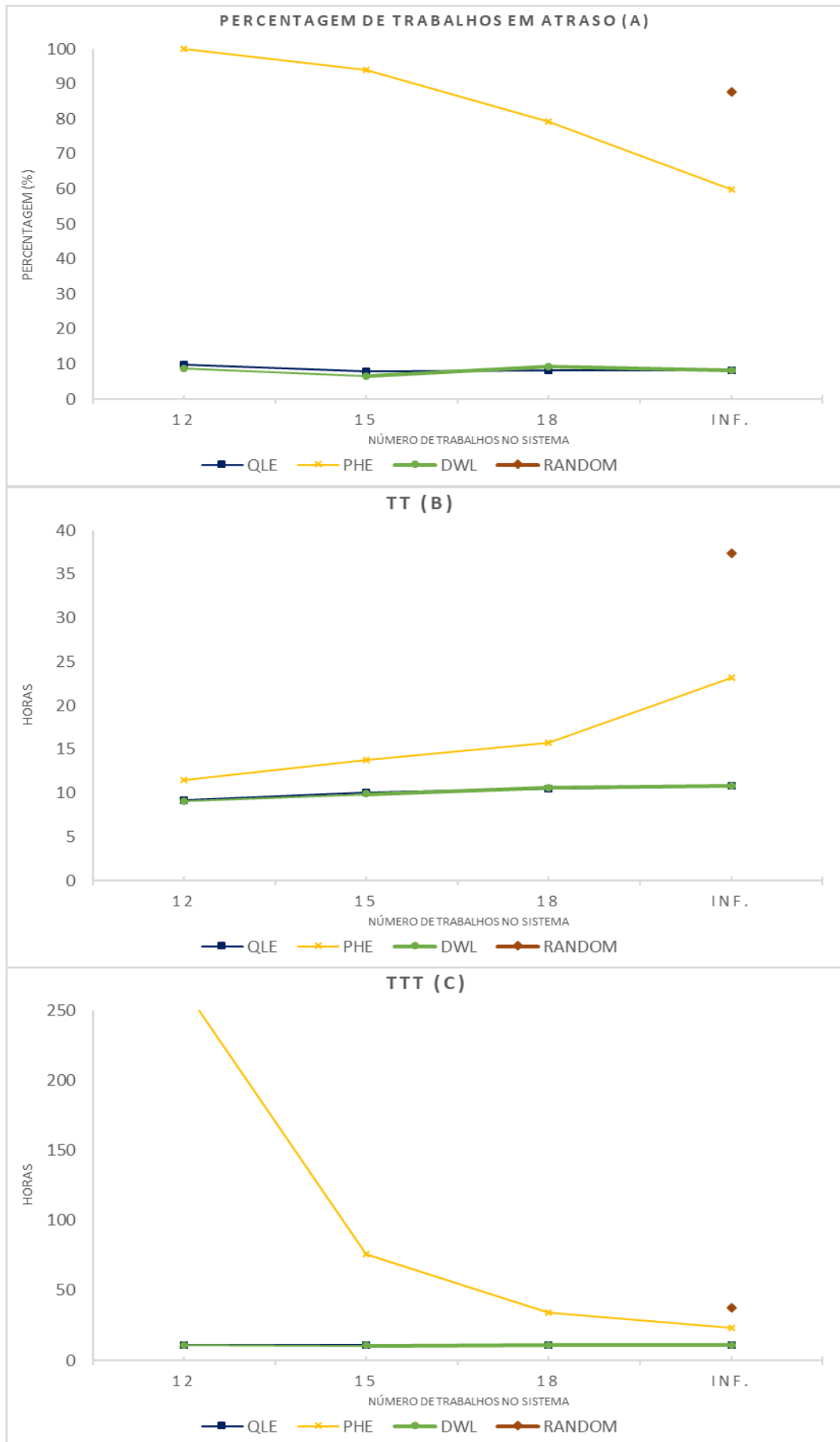
Após apresentação no capítulo anterior do sistema de produção, modelo de simulação, plano experimental e respectivas medidas de desempenho, neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no estudo de simulação. Na secção 4.1, são apresentados os resultados num cenário base, comparando os métodos APC para diferentes níveis de carga no sistema. Nas secções seguintes é analisado o impacto das regras de sequenciação nas filas de espera das máquinas para despacho (secção 4.2) e das regras de sequenciação na *pool* para lançamento em produção (secção 4.3). Em seguida é realizada uma análise de sensibilidade para estudar a alteração de parâmetros em dois métodos e, por fim, na secção 4.4, é realizada uma análise da parte prática.

### 4.1 Cenário Base: Impacto dos métodos APC no desempenho do sistema

Considerou-se como cenário base (ou ponto de partida) o cenário experimental em que a sequenciação dos trabalhos para lançamento em produção e para despacho nas máquinas é baseada na regra FCFS.

Na Figura 23 são apresentados os resultados obtidos para os métodos APC, para as diferentes medidas de desempenho em estudo. Nos gráficos destas figuras encontram-se representadas curvas de desempenho que mostram o impacto nos métodos para os diferentes níveis de carga no sistema, obtidos por ajuste do limite de trabalhos considerados para lançamento. A marca mais à direita em cada uma das curvas refere-se a infinito, representando o lançamento não controlado, i.e., todos os trabalhos ou encomendas que chegam ao sistema são lançados imediatamente em produção. As marcas à esquerda dessa referem-se aos limites de 18, 15 e 12 (marca mais à esquerda). Estes limites traduzem-se em diferentes valores de TT para cada método, sendo estes tanto menores quanto menor o valor de limite de trabalhos em produção. Isto acontece porque havendo menos trabalhos em produção, pela lei de *Little* (Little & Graves, 2008), o tempo de produção é também menor, uma vez que a capacidade do sistema se mantém inalterada.

A diferença entre o TTT e o TT mede o tempo que os trabalhos passam na *pool* aguardando lançamento em produção. Com o aumento do número de trabalhos lançado em produção, esta diferença vai diminuindo até se tornarem iguais. Isto acontece quando os trabalhos entram imediatamente no espaço fabril, sem esperar na *pool*.



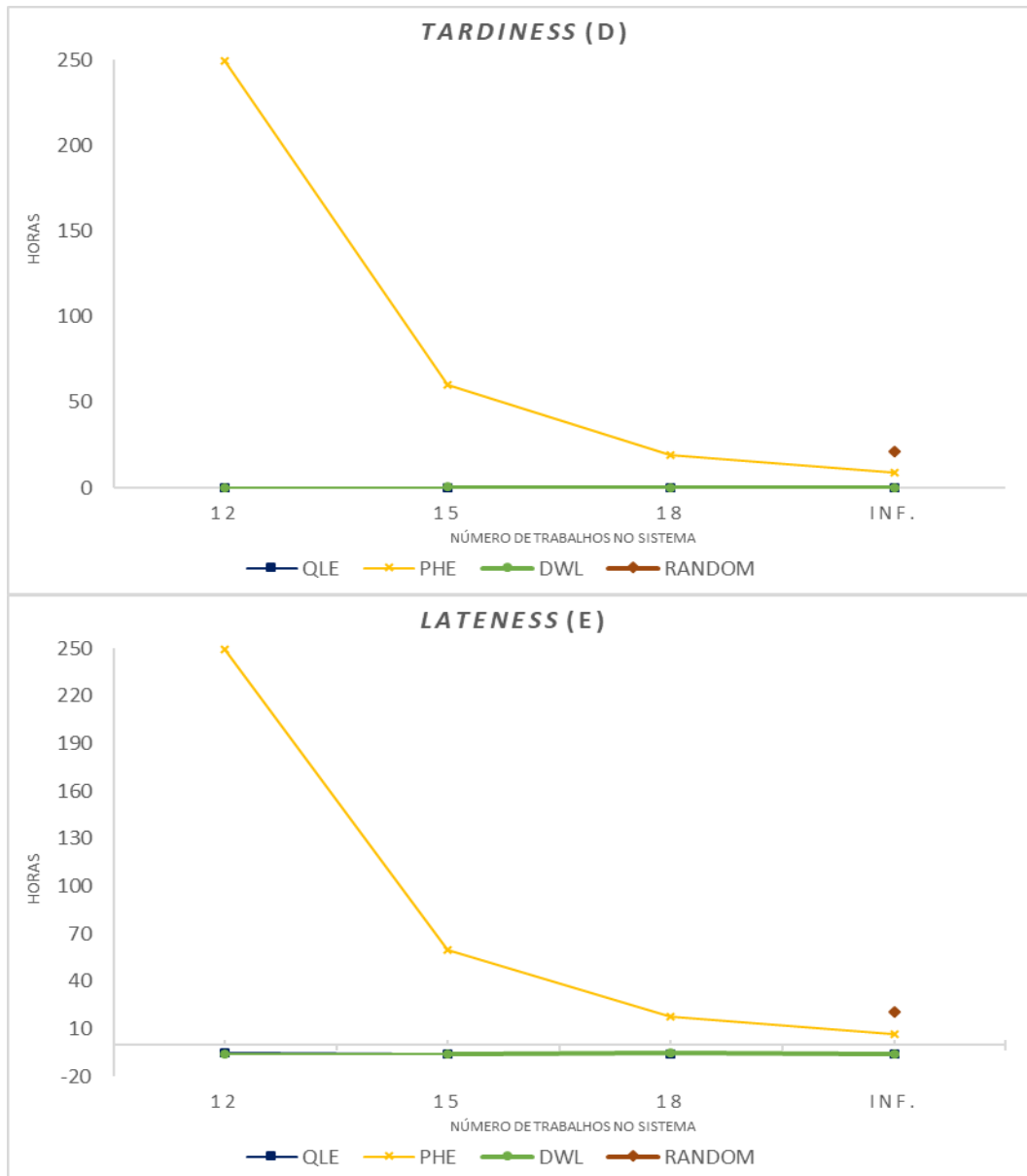


Figura 23 - Resultados das medidas de desempenho - Cenário Base

No método RANDOM não foi possível simular o seu comportamento para os valores 12, 15 e 18. Aparentemente uma alocação aleatória de trabalhos às máquinas de cada estágio produtivo (que pode levar a um aumento dos tempos de produção) em conjunto com um lançamento controlado de trabalhos em produção resulta em situações de bloqueio.

Analisando o gráfico da percentagem de trabalhos em atraso (A), pode-se concluir que os métodos RANDOM e PHE têm um desempenho bastante pior que os restantes. No caso do método PHE o desempenho piora quando o número de trabalhos no espaço fabril é restringido. Isto pode ser observado por uma curva que apresenta uma tendência decrescente, quando restringimos os trabalhos lançados em produção, sendo

que quando é estabelecido um limite de 12, resulta em cerca de 100% dos trabalhos entregues fora do prazo.

A diferença no desempenho para os métodos DWL e QLE é bastante elevada no que toca à percentagem de trabalhos em atraso, sendo que estes dois métodos têm um comportamento muito semelhante entre si. O QLE regista o melhor resultado, cerca de 8,0% de trabalhos em atraso quando o limite de trabalhos é 15, permitindo uma redução de cerca de 86 pontos percentuais em relação ao PHE neste ponto. O pior resultado é obtido quando o limite é 12 (10,0%). Em relação ao DWL, este obtém o melhor resultado (6,5%), quando o limite é 15, sendo também o melhor resultado global de todos os métodos, o qual é inferior em cerca de 1,5 pontos percentuais relativamente ao QLE. Para um limite de trabalhos não restritivo (infinito), considerou-se que o limite de carga em cada estágio também não era restringido, pelo que os dois métodos (DWL e QLE) apresentam o mesmo comportamento, como seria de esperar.

Relativamente às restantes medidas de desempenho, o resultado é idêntico, ou seja, os métodos RANDOM e PHE apresentam o pior desempenho.

O TTT (C) representa o tempo total de um trabalho no sistema, incluindo o tempo na *pool* (onde o trabalho aguarda o seu lançamento em produção) e tempo no espaço fabril. A curva do TTT é idêntica à da percentagem de trabalhos em atraso. Para um limite de 12 trabalhos, o valor de TTT no PHE é de 265,9 horas, ou seja, medindo a diferença com o TT nesta marca, os trabalhos passam apenas 4,3% do tempo no espaço fabril. Este valor vai diminuindo até às 23,2 horas, quando os trabalhos entram imediatamente em produção após a sua chegada ao sistema. A diferença para o valor obtido neste ponto indica que no método PHE os trabalhos demoram em média mais 12 horas a serem processados do que nos métodos QLE e DWL.

No DWL, o menor valor de TTT (10,6 horas) é obtido quando o limite é 15. Na marca mais à esquerda no gráfico (limite de 12), a diferença entre o TTT e o TT mostra que, os trabalhos passam em média 1,8 horas do seu tempo na *pool* representando um total 83,9% do tempo total, no espaço fabril. O QLE apresenta um desempenho idêntico ao DWL para um limite de 15 (10,9 horas).

Relativamente ao *Tardiness* (D), o método DWL apresenta os melhores resultados (0,186 horas) para o limite 15. O QLE tem um desempenho ligeiramente pior para o mesmo limite (0,254 horas).

Finalmente relativamente ao *Lateness* (E), os métodos DWL e QLE permitem a conclusão dos trabalhos cerca de 6 horas antes da data de entrega. Já o método PHE resulta num atraso de cerca de 6,7 horas, em média, na melhor das situações, enquanto o método RANDOM, resulta num atraso de cerca de 20,8 horas, i.e. 14,1 horas a mais que o PHE.

## 4.2 Impacto da alteração das regras de sequenciação das filas de espera nas máquinas para despacho

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o impacto da alteração das regras de despacho nas máquinas no desempenho dos métodos APC, quando os restantes fatores experimentais, são mantidos nos níveis considerados no cenário base. Os valores são apresentados através de tabelas, sendo a diferença calculada.

A figura 24 apresenta os resultados obtidos para as duas regras de despacho considerados EDD (*Earliest Due Date*) e FCFS (*First Come First Served*). A diferença permite perceber o impacto da regra de despacho quando o valor é positivo, a performance do sistema com a regra EDD é melhor e quando é negativo, traduz o comportamento melhor do sistema com a regra FCFS.

QLE	Regras de despacho (máquinas)				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	9,9 ±0,54	10,0 ±0,54	0,2%	
	15	8,1 ±0,42	8,0 ±0,42	-0,3%	
	18	8,1 ±0,43	8,1 ±0,42	0,3%	
	Inf.	8,1 ±0,41	8,1 ±0,41	0,4%	
TT (horas)	12	9,2 ±0,01	9,2 ±0,01	-0,003%	
	15	10,0 ±0,02	10,0 ±0,02	0,005%	
	18	10,5 ±0,04	10,5 ±0,04	0,016%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,033%	
TTT (horas)	12	11,2 ±0,08	11,2 ±0,08	0,021%	
	15	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	-0,05%	
	18	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,006%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,033%	
Tardiness (horas)	12	0,4 ±0,04	0,4 ±0,04	0,76%	
	15	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	-1,26%	
	18	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,08%	
	Inf.	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,69%	
Lateness (horas)	12	-5 ±0,08	-5 ±0,08	0,0%	
	15	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	
	18	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	
	Inf.	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	

PHE	Regras de despacho (máquinas)				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	100,0 ±0,07	99,9 ±0,10	-0,02%	
	15	94,9 ±1,31	94,1 ±1,38	-0,8%	
	18	81,7 ±1,56	79,2 ±1,63	-3,1%	
	Inf.	66,5 ±0,94	59,9 ±0,86	-10,9%	
TT (horas)	12	11,5 ±0,00	11,5 ±0,00	-0,1%	
	15	13,8 ±0,02	13,8 ±0,02	-0,2%	
	18	15,8 ±0,06	15,8 ±0,06	-0,3%	
	Inf.	23,5 ±0,38	23,2 ±0,37	-1,4%	
TTT (horas)	12	271,6 ±13,58	265,9 ±13,87	-2,2%	
	15	81,8 ±7,91	76,1 ±7,32	-7,5%	
	18	36,1 ±2,45	34,5 ±2,14	-4,7%	
	Inf.	23,5 ±0,38	23,2 ±0,37	-1,4%	
Tardiness (horas)	12	255,1 ±13,58	249,4 ±13,87	-2,3%	
	15	65,5 ±7,87	59,9 ±7,28	-9,4%	
	18	20,5 ±2,39	19,0 ±2,08	-7,8%	
	Inf.	8,7 ±0,34	8,7 ±0,32	0,1%	
Lateness (horas)	12	255,1 ±13,58	249,4 ±13,87	-2,3%	
	15	65,3 ±7,91	59,6 ±7,32	-9,5%	
	18	19,6 ±2,45	18,0 ±2,14	-9,0%	
	Inf.	7,0 ±0,38	6,7 ±0,37	-4,8%	

DWL	Regras de despacho (máquinas)				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	8,7 ±0,48	8,7 ±0,48	0,0%	
	15	6,5 ±0,35	6,5 ±0,35	0,0%	
	18	9,3 ±0,47	9,3 ±0,47	0,0%	
	Inf.	8,1 ±0,41	8,1 ±0,41	0,0%	
TT (horas)	12	9,1 ±0,01	9,1 ±0,01	0,0%	
	15	9,9 ±0,02	9,9 ±0,02	0,0%	
	18	10,6 ±0,04	10,6 ±0,04	0,0%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
TTT (horas)	12	10,9 ±0,07	10,9 ±0,07	0,0%	
	15	10,6 ±0,05	10,6 ±0,05	0,0%	
	18	11,1 ±0,07	11,1 ±0,07	0,0%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
Tardiness (horas)	12	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
	15	0,2 ±0,02	0,2 ±0,02	0,0%	
	18	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
	Inf.	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
Lateness (horas)	12	-6 ±0,07	-6 ±0,07	0,0%	
	15	-6 ±0,05	-6 ±0,05	0,0%	
	18	-5 ±0,07	-5 ±0,07	0,0%	
	Inf.	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	

Figura 24 - Comparação de valores com alteração da regra de despacho nas máquinas

Como se pode observar, nos métodos QLE e DWL, as regras de despacho resultam num desempenho idêntico para todas as medidas de desempenho e para todos os limites de trabalhos lançados em produção considerados. NO DWL, não existe qualquer alteração nos valores, enquanto no QLE a diferença é muito ligeira, a margem de erro não permite identificar o impacto. No entanto, no QLE a EDD tem um comportamento médio ligeiramente superior.

Relativamente ao método PHE, a regra EDD desempenha pior quando o limite de trabalhos no sistema não é restringido ou é pouco restringido, desempenhando de forma idêntica quando o limite é fortemente restringido. Isto acontece porque havendo mais trabalhos em fila de espera, significa que existem mais oportunidades para as regras implementarem as suas lógicas de sequenciação e, portanto, operarem de forma diferente. De forma idêntica no método RANDOM a regra EDD desempenha pior. Note-se que neste caso, são apenas apresentados resultados para a situação em que não existe restrição no lançamento de trabalhos em produção. Este facto não acontece no QLE e DWL, visto que estes métodos dividem os trabalhos de maneira eficaz no ambiente produtivo, ou seja, ao contrário do PHE, o número de trabalhos em fila de espera é baixo e a alteração das regras não tem impacto na decisão.

### 4.3 Impacto da alteração das regras de sequenciação na *pool* para lançamento em produção

Esta secção apresenta o impacto da alteração das regras de sequenciação na *pool* para lançamento em produção, quando os restantes fatores experimentais, são mantidos nos níveis considerados no cenário base. Os valores são comparados através de tabelas, identificando as diferenças entre regras tal como realizado na secção anterior.

Nos métodos PHE e QLE, apenas existe a *pool* inicial que limita o número de trabalhos nos sistemas, mas no DWL, além da *pool* que mantém os trabalhos quando o limite é ultrapassado no sistema, possui limites de carga em cada máquina de um estágio de produção que limitam os trabalhos que aí se pode encontrar. A regra usada na *pool* inicial e nas existentes antes dos estágios de produção é a mesma, ou seja, a alteração das regras é ampliada a todas.

A figura 25 apresenta os resultados obtidos para as duas regras de sequenciação consideradas EDD (*Earliest Due Date*) e FCFS (*First Come First Served*).

QLE	Regras de sequenciação ( <i>pool</i> )				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	10,0 ±0,54	10,0 ±0,54	0,0%	
	15	8,0 ±0,42	8,0 ±0,42	0,0%	
	18	8,1 ±0,42	8,1 ±0,42	0,0%	
	Inf.	8,1 ±0,41	8,1 ±0,41	0,0%	
TT (horas)	12	9,2 ±0,01	9,2 ±0,01	0,0%	
	15	10,0 ±0,02	10,0 ±0,02	0,0%	
	18	10,5 ±0,04	10,5 ±0,04	0,0%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
TTT (horas)	12	11,2 ±0,08	11,2 ±0,08	0,0%	
	15	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
	18	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
Tardiness (horas)	12	0,4 ±0,04	0,4 ±0,04	0,0%	
	15	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
	18	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
	Inf.	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
Lateness (horas)	12	-5 ±0,08	-5 ±0,08	0,0%	
	15	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	
	18	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	
	Inf.	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	

PHE	Regras de sequenciação ( <i>pool</i> )				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	99,9 ±0,10	99,9 ±0,10	0,0%	
	15	94,1 ±1,38	94,1 ±1,38	0,0%	
	18	79,2 ±1,63	79,2 ±1,63	0,0%	
	Inf.	59,9 ±0,86	59,9 ±0,86	0,0%	
TT (horas)	12	11,5 ±0,00	11,5 ±0,00	0,0%	
	15	13,8 ±0,02	13,8 ±0,02	0,0%	
	18	15,8 ±0,06	15,8 ±0,06	0,0%	
	Inf.	23,2 ±0,37	23,2 ±0,37	0,0%	
TTT (horas)	12	265,9 ±13,87	265,9 ±13,87	0,0%	
	15	76,1 ±7,32	76,1 ±7,32	0,0%	
	18	34,5 ±2,14	34,5 ±2,14	0,0%	
	Inf.	23,2 ±0,37	23,2 ±0,37	0,0%	
Tardiness (horas)	12	249,4 ±13,87	249,4 ±13,87	0,0%	
	15	59,9 ±7,28	59,9 ±7,28	0,0%	
	18	19,0 ±2,08	19,0 ±2,08	0,0%	
	Inf.	8,7 ±0,32	8,7 ±0,32	0,0%	
Lateness (horas)	12	249,4 ±13,87	249,4 ±13,87	0,0%	
	15	59,6 ±7,32	59,6 ±7,32	0,0%	
	18	18,0 ±2,14	18,0 ±2,14	0,0%	
	Inf.	6,7 ±0,37	6,7 ±0,37	0,0%	

DWL	Regras de sequenciação ( <i>pool</i> )				
	Lim.	EDD	FCFS	Dif. (%)	
Percentage m de Trabalhos em Atraso (%)	12	8,6 ±0,50	8,7 ±0,48	1,0%	
	15	6,5 ±0,35	6,5 ±0,35	0,2%	
	18	9,4 ±0,47	9,3 ±0,47	-1,0%	
	Inf.	8,1 ±0,41	8,1 ±0,41	0,0%	
TT (horas)	12	9,1 ±0,01	9,1 ±0,01	0,030%	
	15	9,9 ±0,02	9,9 ±0,02	0,004%	
	18	10,6 ±0,04	10,6 ±0,04	-0,044%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
TTT (horas)	12	10,9 ±0,07	10,9 ±0,07	0,01%	
	15	10,6 ±0,05	10,6 ±0,05	0,01%	
	18	11,1 ±0,07	11,1 ±0,07	-0,06%	
	Inf.	10,9 ±0,06	10,9 ±0,06	0,0%	
Tardiness (horas)	12	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	1,1%	
	15	0,2 ±0,02	0,2 ±0,02	0,5%	
	18	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	-1,9%	
	Inf.	0,3 ±0,03	0,3 ±0,03	0,0%	
Lateness (horas)	12	-6 ±0,08	-6 ±0,07	0,0%	
	15	-6 ±0,05	-6 ±0,05	0,0%	
	18	-5 ±0,07	-5 ±0,07	0,0%	
	Inf.	-6 ±0,06	-6 ±0,06	0,0%	

Figura 25 - Comparação de valores com alteração da regra de sequenciação na *pool*

Através da análise da figura 25, podemos compreender que para o método QLE e PHE a alteração da regra de sequenciação na *pool* não tem qualquer impacto nos resultados. Isto acontece porque todos os tipos de trabalhos têm a mesma data de entrega e o mesmo número de operações, ou seja, os primeiros trabalhos que chegam à *pool* têm a data de entrega mais cedo e são os primeiros a sair, logo ordenar os trabalhos pela data de entrega é o mesmo de ordenar pela regra FCFS.

Ao contrário do registado na secção 4.2, a alteração das regras de sequenciação na *pool* no DWL permite obter diferenças nos resultados. No entanto, tal como no QLE, as diferenças são muito ligeiras e a margem de erro não permite chegar à conclusão de qual a regra que beneficia o sistema. A ligeira melhoria é possível através da aplicação da regra EDD.

## 4.4 Análise de sensibilidade

Com o objetivo de alargar o plano experimental, foram realizados dois estudos para avaliar o impacto da alteração de parâmetros nos métodos DWL e PHE. No primeiro foi analisado o impacto do limite de carga nos estágios de produção e no segundo a constante de evaporação. Os restantes fatores experimentais, são mantidos nos níveis considerados no cenário base, nomeadamente, as regras de sequenciação na *pool* e as regras de despacho.

### 4.4.1 Alteração do limite de carga no DWL

Havendo um limite de trabalhos no sistema, o método DWL distribuiu esses trabalhos pelas diversas máquinas estabelecendo um limite de carga em cada máquina. Este limite de carga foi definido no estudo de simulação como sendo igual ao limite de trabalhos a dividir pelo número de máquinas no sistema e multiplicado pelo tempo médio de processamento dos trabalhos, tal como indicado na fórmula 15. Contudo, como o tempo de processamento depende da máquina selecionada, três situações foram consideradas para este tempo (em função dos possíveis tempos de processamento identificados na Tabela 6), nomeadamente 2, 2,5 e 3.

$$\text{Limite carga (máquina)} = \frac{\text{limite Trabalhos no sistema}}{\text{Número Máquinas}} * T_{\text{Processamento}} \tag{15}$$

No método DWL usado no cenário base, o tempo de processamento considerado é 3, nesta secção admite-se que tempo de processamento é alterado para 2,5 e 2 e analisa-se o impacto. O método original é identificado como DWL-3 e os restantes DWL-2.5 e DWL-2.

Os limites de carga obtidos são apresentados nas tabelas seguintes (Tabelas 9 e 10).

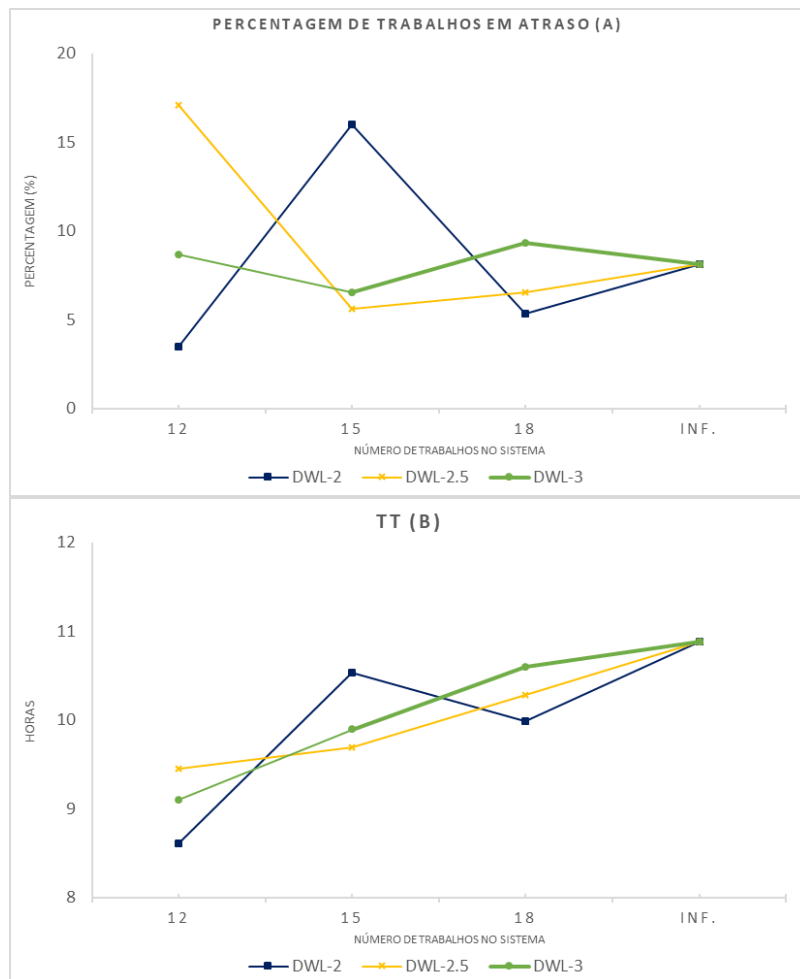
Tabela 9 - Limite de carga do método DWL-2

<b>DWL-2</b>				
Nível	Limite trabalhos	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
		Limite (h)	Limite (h)	Limite (h)
1	12	2,7	2,7	2,7
2	15	3,3	3,3	3,3
3	18	4	4	4
4	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Tabela 10 - Limite de carga do método DWL-2.5

<b>DWL-2.5</b>				
Nível	Limite trabalhos	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
		Limite (h)	Limite (h)	Limite (h)
1	12	3,3	3,3	3,3
2	15	4,2	4,2	4,2
3	18	5	5	5
4	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Para analisar o impacto da alteração do limite de carga nas máquinas, foram desenvolvidos gráficos (Figura 26) que permitem comparar a evolução das linhas dos métodos.



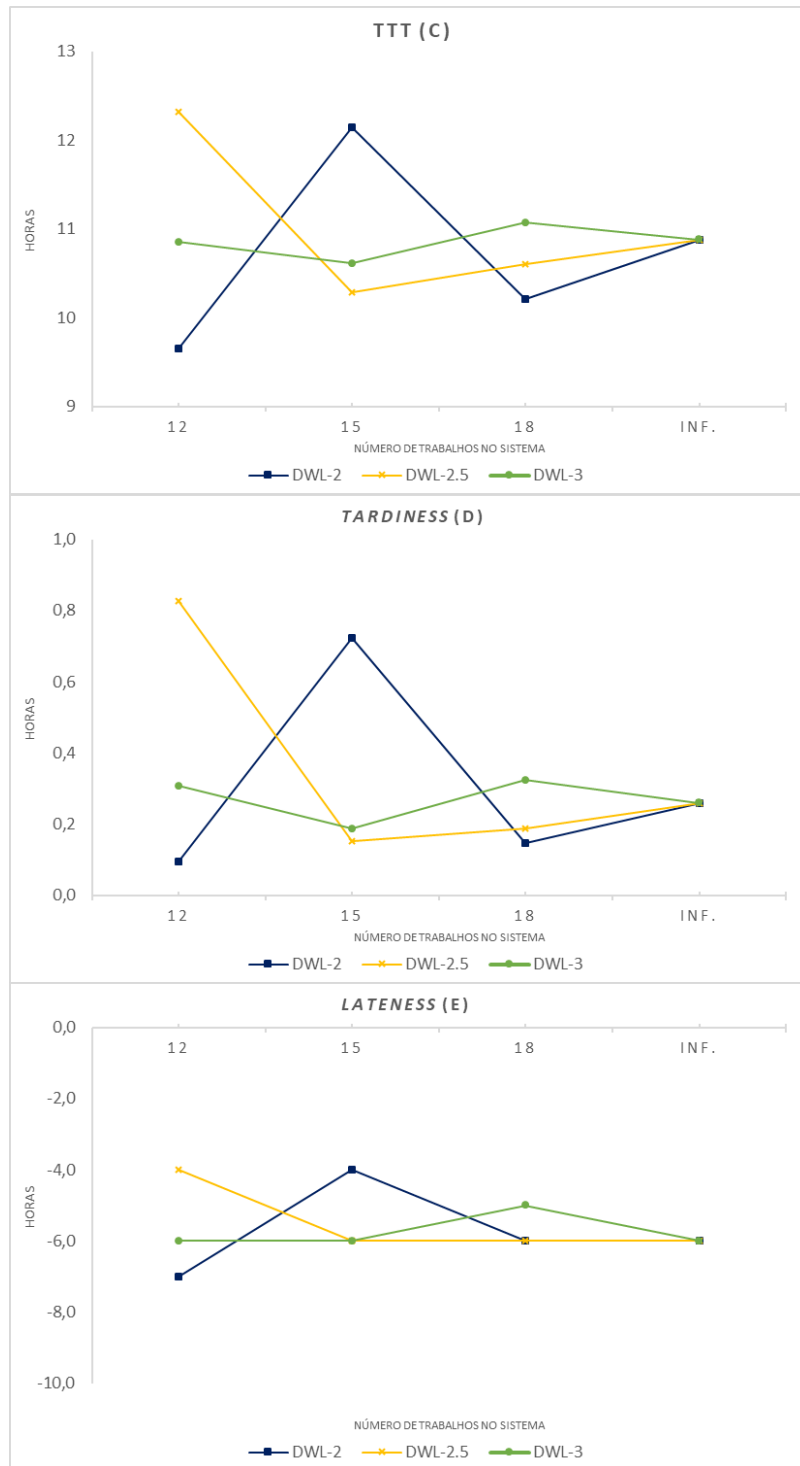


Figura 26 - Resultados das medidas de desempenho para os diferentes limites de carga no DWL

Analisando a marca mais à esquerda, para um limite de 12 trabalhos, o DWL-2 permite uma melhoria considerável do sistema, obtendo uma diminuição de 5,2 pontos percentuais na Percentagem de Trabalhos em Atraso (A), para os 3,5%. Esta tendência ocorreu nas restantes medidas de desempenho, tendo obtido os valores de 8,6 horas no TT (B), 9,7 horas no TTT (C) e 0,0939 horas no *Tardiness* (D). No *Lateness* (E), os trabalhos estão a ser entregues com uma média de 7 horas antes do prazo de entrega. Estes são os melhores resultados obtidos em todos os fatores experimentais e métodos.

Apesar de para um limite 15 ter uma quebra muito considerável na sua performance, volta a obter os melhores resultados quando o limite é 18, permitindo uma diminuição de 3,95 pontos percentuais em relação ao DWL original, para cerca de 5,3%, atingindo os melhores resultados quando o limite é 18.

O método DWL-2.5 permite uma melhoria em relação ao método DWL-3 quando o limite é 15, a taxa de percentagem de trabalhos em atraso decresce em 0,91 pontos percentuais para os 5,6%. Esta evolução é acompanhada nas restantes medidas de desempenho e nesta marca (limite 15), o método DWL-2.5 regista o melhor comportamento. No entanto, quando o limite é 12, a sua performance, piora consideravelmente, mas no limite 18, é melhor relativamente ao método usado no cenário base, melhorando a taxa de percentagem de trabalhos em atraso para os 6,5%.

O estudo realizado permite concluir que o método DWL-2 é o melhor método quando o limite é 12 ou 18, obtendo a melhor prestação de todos os modelos avaliados na dissertação. O método DWL-2.5 obtém o melhor rendimento quando o limite é 15, ou seja, o DWL original é superado em todos os limites estudados neste estudo.

Em função deste estudo, a tabela 11 demonstra a melhor combinação possível dos limites de carga do DWL que permitem potencializar os resultados do método.

Tabela 11 - Combinação dos melhores limites de carga em cada um dos estágios

Nível	Limite. trabalhos	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3
		Limite (h)	Limite (h)	Limite (h)
1	12	2,7	2,7	2,7
2	15	4,2	4,2	4,2
3	18	4	4	4
4	Infinito	Infinito	Infinito	Infinito

Tendo em conta o estudo na secção 4.3, o método DWL-2 foi testado com a alteração da regra de sequenciação na *pool* para o limite 12 (Figura 27).

DWL-2		Percentagem de Trabalhos de atraso (%)		TT (horas)		TTT (horas)		Tardiness (horas)		Lateness (horas)	
	Lim.	12		12		12		12		12	
Regras de sequenciação ( <i>pool</i> )	EDD	3,4	0,26	8,6	0,48	9,6	0,01	0,1	0,01	-7,0	0,04
			-0,26				-0,48				-0,01
	FCFS	3,5	0,26	8,6	0,35	9,7	0,01	0,1	0,01	-7,0	0,04
			-0,26				-0,35				-0,01
	Diferença	3,31%		0,07%		0,14%		2,66%		0,00%	

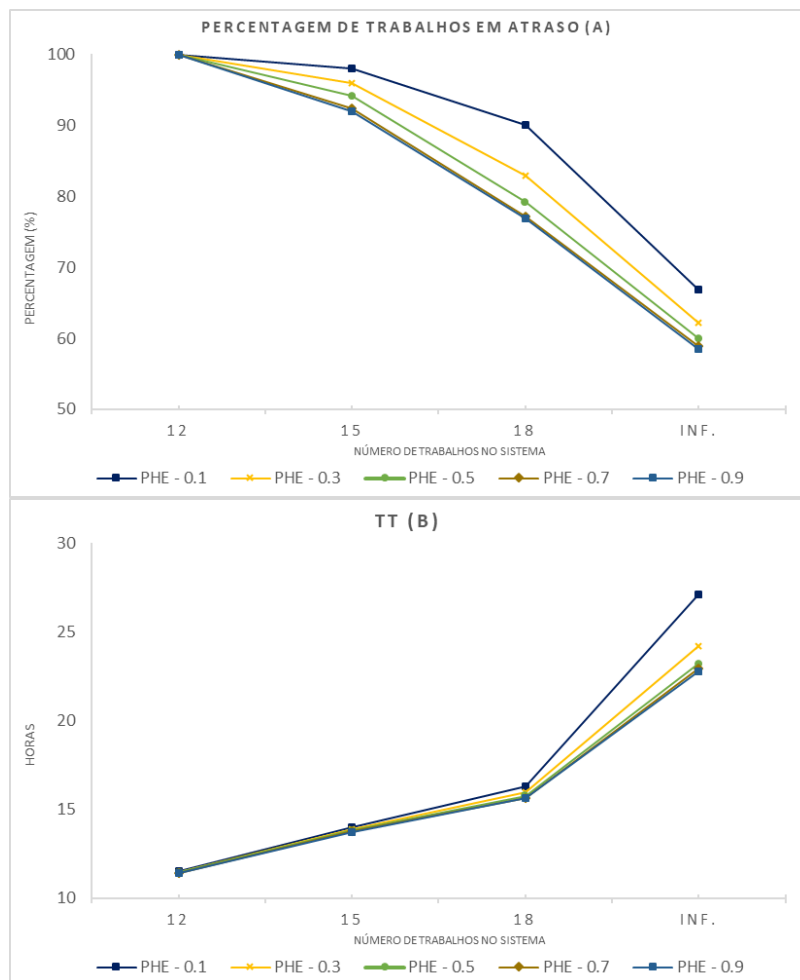
Figura 27 - Comparação de valores com alteração da regra de sequenciação na *pool* no DWL-2

Apesar do desempenho ser idêntico com a alteração das regras, o método teve uma ligeira melhoria com uma percentagem de trabalhos em atraso de 3,4% e um TTT de 9,6 horas com a regra de sequenciação EDD.

#### 4.4.2 Alteração da constante de evaporação no PHE

Por forma a tentar melhorar o comportamento do método PHE, procedeu-se à alteração da constante de evaporação  $\alpha$  na fórmula (3). Este valor varia entre 0 e 1 e além do valor do cenário base (0.5) foram usados 4 valores para avaliar a influência deste parâmetro na fórmula (0.1, 0.3, 0.7 e 0.9).

Para analisar o impacto da alteração da constante de evaporação, foram desenvolvidos gráficos (Figura 28) que permitem comparar a evolução das linhas dos métodos.



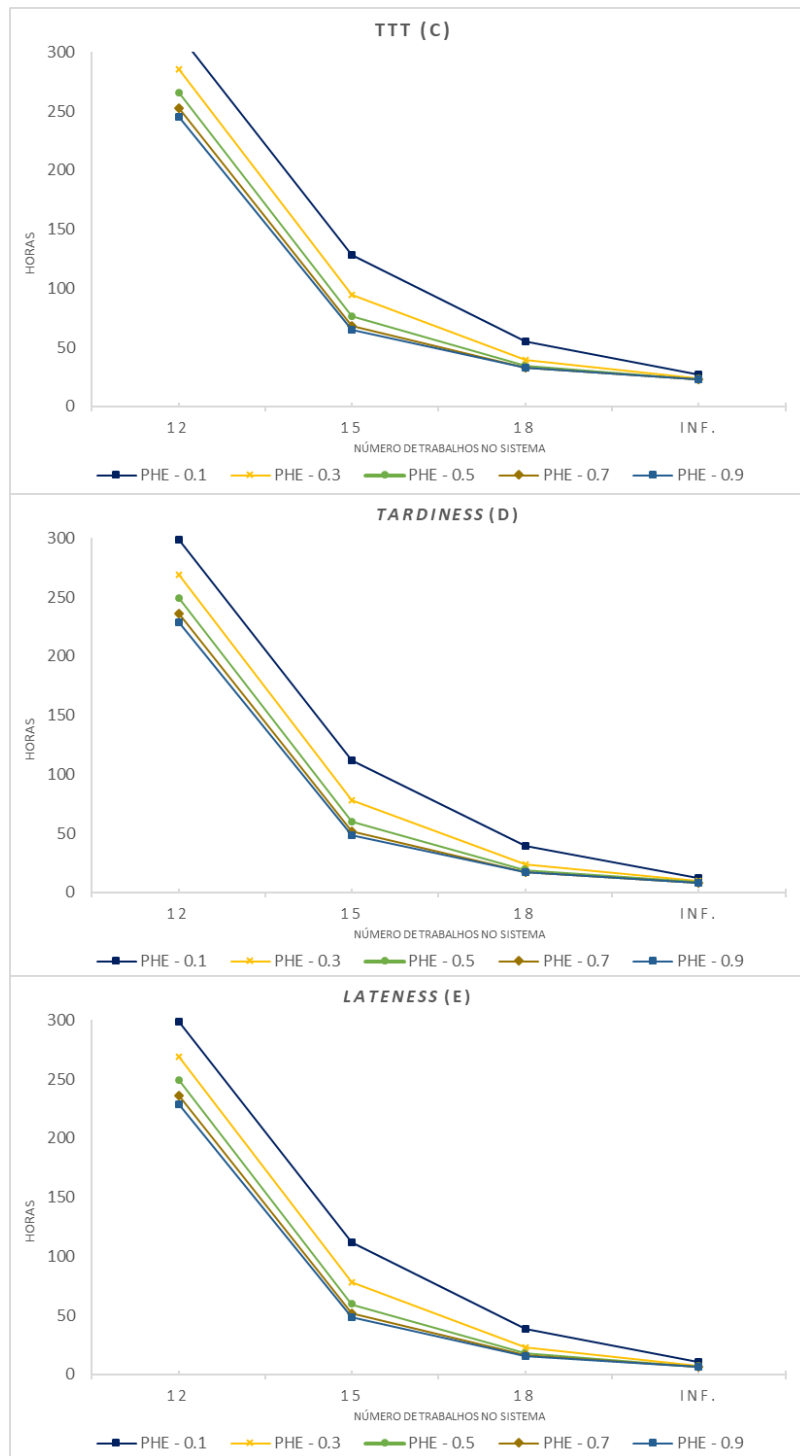


Figura 28 - Resultados das medidas de desempenho para os diferentes valores da constante evaporação no PHE

Analisando os resultados obtidos com a alteração da constante de evaporação no PHE, a curva segue a mesma tendência e a performance melhorou ligeiramente com os valores mais elevados do  $\alpha$ , 0.7 e 0.9. Nos valores mais baixos (0.1 e 0.3) testados, o comportamento foi inferior ao considerado no cenário base. A percentagem de trabalhos em atraso diminuiu 1,4 pontos percentuais para os 58,5% com o valor 0.9 e

quando o limite é infinito e o TTT e TT diminuiu para as 22,8 horas. O *Lateness* e o *Tardiness* registaram os valores de 6,3 e 8,4 horas, respetivamente.

#### 4.5 Análise do melhor cenário para cada método

Assumindo a percentagem de trabalhos em atraso como a principal medida de desempenho no estudo, são a seguir identificados os melhores níveis para cada um dos métodos.

No RANDOM, o melhor cenário é obtido quando o limite de trabalhos é infinito e a regra de sequenciação das filas de espera nas máquinas para despacho é a FCFS. Essa combinação permite obter uma performance de 87,7% de trabalhos em atraso e 37,3 no TTT. A regra de sequenciação de trabalho na *pool* não tem impacto.

Relativamente ao PHE, o melhor cenário resulta da combinação da regra de despacho nas máquinas FCFS com o lançamento de trabalhos infinito, com um valor de 60,0%, para um TTT de 23,2 horas. A regras de sequenciação de trabalho na *pool* não tem impacto. No entanto, quando o método é testado na análise de sensibilidade com alteração da constante de evaporação, obtém uma percentagem de trabalhos em atraso de 58,5% e um TTT de 22,8 horas.

No método QLE, o melhor cenário é obtido conjugando a regra de despacho nas máquinas FCFS, apesar da diferença ser ligeira para a regra EDD, com o lançamento controlado com um limite de 15 trabalhos no sistema, resultando num valor de 8,0% e um TTT de 10,9 horas.

Finalmente, no método DWL, a regra de despacho nas máquinas não tem impacto. No entanto, este é o único método que a alteração das regras de sequenciação na *pool* tem um ligeiro impacto, mas a diferença é irrisória, logo não é possível concluir a regra que traduz num melhor comportamento. Após a análise de sensibilidade, o melhor cenário é obtido conjugando o limite de trabalhos no sistema de 12 trabalhos e limite de carga em cada máquina de 2,7 horas. Isto resulta em cerca de 3,4% de trabalhos em atraso, com um TTT de 9,6 horas.

Em função dos resultados registados, e com base nos métodos testados, pode-se concluir que o método DWL apresenta os melhores resultados de desempenho.

# 5. CONCLUSÃO

5.1. Principais contributos do trabalho

5.2. Propostas de trabalhos futuros



## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Principais contributos do trabalho

As empresas necessitam de encontrar soluções para lidar com ambientes cada vez mais complexos e dinâmicos. Os sistemas autónomos de controlo de produção representam uma alternativa que visa melhorar o desempenho dos sistemas de produção pela reação rápida e flexível às mudanças ou alterações que possam ocorrer.

A dissertação foi desenvolvida com o objetivo de identificar os principais métodos APC propostos na literatura, modelar o funcionamento de uma seleção de métodos, recorrendo a um software de simulação discreta e estudar o comportamento destes no contexto de lançamento imediato e lançamento controlado de trabalhos em produção. Foram selecionados três métodos APC, *Pheromone* (PHE), *Queue Length Estimator* (QLE) e *Direct Workload* (DWL), e comparados com um método de decisão puramente aleatória (RANDOM). Para a situação de lançamento de trabalhos em produção, foi usado o mecanismo CONWIP (*CON*stant work in process), o qual limita o número de trabalhos em produção.

O estudo é realizado para diferentes cenários produtivos, decorrentes de uma configuração FFS (*Flexible Flow Shop*), quatro níveis de lançamento controlado, duas regras de sequenciação dos trabalhos nas filas de espera das máquinas para efeito de despacho e duas regras de sequenciação de trabalhos na *pool*.

Os resultados obtidos mostram que o método DWL obteve o melhor resultado global para as medidas de desempenho estudadas (i.e., percentagem de trabalhos em atraso, *ThroughputTime*, *Total ThroughputTime*, *tardiness* e *lateness*). O DWL mostrou desempenhar ligeiramente melhor que QLE e substancialmente melhor que os métodos PHE e RANDOM. Verificou-se ainda que a da regra de sequenciação na *pool* e da regra de despacho nas máquinas não teve impacto no desempenho dos métodos DWL e do QLE, tendo sido apontadas explicações para este comportamento.

No que concerne ao método DWL, os resultados obtidos permitem melhorar o desempenho no que se refere à percentagem de trabalhos em atraso em 4,6%, relativamente ao QLE, 55,1% relativamente ao PHE e 84,4% relativamente ao RANDOM.

## 5.2 Propostas de trabalhos futuros

A área do Controlo Autónomo de Produção é relativamente recente, logo existem inúmeras vertentes que podem ser exploradas. Apesar da existência de diversos métodos no âmbito teórico e explorados na revisão de literatura desta dissertação, muitos métodos não foram testados, pelo que o estudo pode ser alargado do à inclusão de novos métodos e novos cenários produtivos. Nesta dissertação foi testado o lançamento controlado de trabalhos no sistema, mas a inclusão de novas variáveis de decisão permite estudar mais aprofundadamente o impacto destes parâmetros nos sistemas. Além destes pontos, seria benéfico estudar a implementação prática dos métodos APC em ambientes industriais e avaliar o impacto e vantagens.

## **6. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**



## 6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Armbruster, D., De Beer, C., Freitag, M., Jagalski, T., & Ringhofer, C. (2006). Autonomous control of production networks using a pheromone approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 363(1), 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.052>
- Cicirello, V. A., & Smith, S. F. (2001). Ant colony control for autonomous decentralized shop floor routing. *Proceedings - 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, ISADS 2001*, 383–390. <https://doi.org/10.1109/ISADS.2001.917443>
- Dashkovskiy, S., Görges, M., & Naujok, L. (2012). Autonomous control methods in logistics - A mathematical perspective. *Applied Mathematical Modelling*, 36(7), 2947–2960. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.075>
- Dashkovskiy, S., Mironchenko, A., & Naujok, L. (2011). Autonomous and Central Control of Production Networks. *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, 27–43. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6_4)
- Fernandes, N. O., Martins, T., & Carmo-Silva, S. (2018). Improving materials flow through autonomous production control. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35(5), 319–327. <https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1479895>
- Freitag, M., Beer, C. De, & Jagalski, T. (2007). Analysing the Dynamics caused by Autonomously Controlled Logistic Objects. *Matrix*, 273–280.
- Gebhardt, N., Jeken, O., & Windt, K. (2011). Exploitation of Manufacturing Flexibilities in Decision Methods for Autonomous Control of Production Processes: Findings from Industrial Practice and Theoretical Analysis. *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, 169–187. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6_13)
- Grundstein, S., Schukraft, S., Scholz-Reiter, S., & Freitag, M. (2015). Evaluation system for autonomous control methods in coupled planning and control systems. *Procedia CIRP*, 33, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.023>
- Grundstein, Sebastian, Freitag, M., & Scholz-Reiter, B. (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*, 42, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.10.006>
- Grundstein, Sebastian, Schukraft, S., Görges, M., & Scholz-Reiter, B. (2013). An approach for applying autonomous production control methods with central production planning. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 7(4), 167–174.
- Grundstein, Sebastian, 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>

- 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, Thomas, & 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. *IoTBD 2016 - Proceedings of the International Conference on Internet of Things and Big Data*, (IoTBD), 441–448. <https://doi.org/10.5220/0005929704410448>
- Little, J. D. C., & Graves, S. C. (2008). Chapter 5 Little ' s Law. *Operations Management*, 115(July 2008), 81–100. <https://doi.org/10.1007/978-0-387>
- Márkus, A., Kis Váncza, T., & Monostori, L. (1996). A Market Approach to Holonic Manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45(1), 433–436. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63096-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63096-0)
- Mehrsai, A., Thoben, K. D., & Scholz-Reiter, B. (2014). Bridging lean to agile production logistics using autonomous carriers in pull flow. *International Journal of Production Research*, 52(16), 4711–4730. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.865851>
- Ngxesha, C., Ncube, O., & Ma, C. (2019). *Complexity-oriented evaluation of production systems for online-switching of autonomous control methods*. 2(July), 233–245. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13535-5>
- Peeters, P., Van Brussel, H., Valckenaers, P., Wyns, J., Bongaerts, L., Kollingbaum, M., & Heikkilä, T. (2001). Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops. *Artificial Intelligence in Engineering*, 15(4), 343–352. [https://doi.org/10.1016/S0954-1810\(01\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0954-1810(01)00026-7)
- Philipp, T., Beer, C. De, Windt, K., & Scholz-reiter, B. (2003). *Evaluation of Autonomous Logistic Processes – Analysis of the Influence of Structural Complexity Department of Planning and Control of Production Systems , BIBA , Uni- versity of Bremen , Germany Introduction The concept of autonomous control requires on .*
- Rekersbrink, H., Makuschewitz, T., & Scholz-Reiter, B. (2009). A distributed routing concept for vehicle routing problems. *Logistics Research*, 1(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s12159-008-0003-4>
- Rekersbrink, H., Scholz-Reiter, B., & Zabel, C. (2010). An autonomous control concept for production logistics. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 46 LNBI, 245–256. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12494-5_22)
- 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). <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- 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.

- Scholz-Reiter, B., & Freitag, M. (2007). Autonomous Processes in Assembly Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), 712–729. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.002>
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., & Jagalski, T. (2005). Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control. *Proc. of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems.*, (2).
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., & Jagalski, T. (2006). The Influence of Production Networks' Complexity on the Performance of Autonomous Control Methods. *Intelligent Computation in Manufacturing Engineering 5*, 317–320.
- Scholz-Reiter, B., Freitag, M., De Beer, C., & Jagalski, T. (2005). Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1), 413–416. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60134-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60134-6)
- Scholz-reiter, B., Görge, M., & Jagalski, T. (2011). Logistic Systems with Multiple Autonomous Control Strategies. *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, 97–111. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19469-6>
- Scholz-Reiter, B., Görge, M., Jagalski, T., & Mehraei, A. (2009). Modelling and analysis of autonomously controlled production networks. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 42(4 PART 1), 846–851. <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0081>
- Scholz-Reiter, B., Görge, 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., Jagalski, T., & Bendul, J. C. (2008). *Autonomous Control of a Shop Floor Based on Bee's Foraging Behaviour*. 415–423. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76862-3>
- Scholz-Reiter, B., Rekersbrink, H., & Freitag, M. (2006). Internet routing protocols as an autonomous control approach for transport networks. *Proc. 5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 341–345. Retrieved from <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-B1-06-002-IC.pdf>
- Scholz-Reiter, B., Rekersbrink, H., & Görge, M. (2010). Dynamic flexible flow shop problems - Scheduling heuristics vs. autonomous control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 465–468. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.030>
- Scholz-Reiter, B, Görge, 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, Bernd, Dashkovskiy, S., Görge, M., & Naujok, L. (2011). Stability analysis of autonomously controlled production networks. *International Journal of Production Research*, 49(16), 4857–4877. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.505215>

- Scholz-Reiter, Bernd, & Jagalski, T. (2008). Modelling Autonomous Control in Production Logistics. *7th International Heinz Nixdorf Symposium Self-Optimizing Mechatronic Systems*, 199–215.
- Scholz-Reiter, Bernd, 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://msepr.engr.wisc.edu/phocadownload/cirp44\\_bio-inspired\\_capacity\\_control.pdf](http://msepr.engr.wisc.edu/phocadownload/cirp44_bio-inspired_capacity_control.pdf)
- Scholz-Reiter, Bernd, Rippel, D., & Sowade, S. (2011). A Concept for Simulation of Autonomous Logistic Processes. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 5(3), 324–333.
- 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>
- Ueda, K., Hatono, I., Fujii, N., & Vaario, J. (2000). Reinforcement learning approaches to Biological Manufacturing System. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49(1), 343–346. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62960-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62960-6)
- 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)
- Wenning, B., Rekersbrink, H., & Timm-giel, A. (2006). Autonomous control by means of distributed routing. *Communication*, 1–12.
- Windt, K, Becker, T., & Kolev, I. (2010). *A comparison of the logistics performance of autonomous control methods in production logistics*. (May), 576–583.
- Windt, Katja, 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, Katja, Böse, F., & Philipp, T. (2008). Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.07.008>
- Windt, Katja, & Hülsmann, M. (2007). *Changing Paradigms in Logistics – Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control*. 1–16.

# APÊNDICES

APÊNDICE I - Amostra de artigos utilizada na revisão de literatura

APÊNDICE II - Representação do estágio produtivo no QLE

APÊNDICE III - Representação do estágio produtivo no DWL

APÊNDICE IV - Representação do estágio produtivo no PHE

APÊNDICE V - Resultados obtidos para todos os cenários



## APÊNDICES

### APÊNDICE I- Amostra de artigos utilizada na revisão de literatura

Autor	Título	Resumo	Tipo de artigo
D. Armbruster; C. De Beer; M. Freitag; T. Jagalski; C. Ringhofer	Autonomous control of production networks using a pheromone approach	Proposto um modelo autónomo de controlo de produção, baseado em feromonas, capaz de responder a flutuações ao nível da procura e problemas no sistema de produção. Criado um modelo matemático e realizada uma simulação que permitem avaliar a capacidade deste modelo de controlo autónomo reagir a problemas durante a produção.	Novo método
F. Böse; K. Windt	Catalogue of criteria for autonomous control in logistics	Baseado na definição de controlo autónomo de produção e nas principais características destes sistemas no contexto logístico, foi desenvolvido um esquema com catálogo de critérios que permite apresentar as particularidades de um sistema autónomos e distinguir os mesmos dos métodos convencionais.	Sistema de avaliação
V.A. Cicirello; S.F. Smith	Ant colony control for autonomous decentralized shop floor routing	Nova abordagem para controlo autónomo de produção, chamado Ant Algorithm, autor inspira-se no comportamento das formigas quando procuram o melhor caminho para o alimento para criar um algoritmo que permitem aos trabalhos escolherem as melhores máquinas durante a sua produção.	Novo método
S. Dashkovskiy; M. Gorges; L. Naujok	Autonomous control methods in logistics - A mathematical perspective	Modelado um sistema autónomo de controlo de produção, através de equações diferenciais não lineares, onde são tidos tempos de transporte e perturbações nos mesmos são tidos em conta. Demonstradas vantagens e desvantagens destes sistemas de uma perspetiva matemática, tendo em conta a robustez e estabilidade.	Controlo autónomo vs Planeamento Central Comparação de métodos
S. Dashkovskiy; A. Mironchenko; L. Naujok	Autonomous and Central Control of Production Networks.	Os métodos de controlo central e autónomos são comparados, tendo como base uma série de parâmetros que influenciam uma comparação da eficácia entre os dois sistemas. Discutidos resultados relativos à estabilidade das redes de produção, e as limitações de ambos os métodos são exploradas e são estudadas formas possíveis de aumentar a eficácia do contolo de produção.	Controlo autónomo vs Planeamento Central
N.O. Fernandes; T. Martins; S. Carmo-Silva	Improving materials flow through autonomous production control	Introduzido um novo método APC para tomada de decisão e a sua performance é comparada com os métodos QLE e PHE. Este método obtém melhores resultados com aqueles que foi comparado, na presença de cargas elevadas de trabalho e alta variabilidade na chegada de pedidos e tempo de operação.	Comparação de métodos Novo método

M. Freitag; C. de Beer; T. Jagalski	Analysing the Dynamics caused by Autonomously Controlled Logistic Objects	Artigo que se concentra na análise da dinâmica causada por objetos logísticos controlados de forma autónoma. Por um lado, a introdução deste tipo de objetos permite a melhoria da estabilidade dos sistemas e adaptabilidade a distúrbios/situações externas. No entanto, pode causar diferentes formas de dinâmica, como oscilações e comportamento caótico de alvos logísticos (e.g. tempo de processamento). Diferentes métodos de controlo autónomos são comparados usando análises de frequência.	Comparação de métodos
N. Gebhardt; O. Jeken; K. Windt	Exploitation of Manufacturing Flexibilities in Decision Methods for Autonomous Control of Production Processes	Apresenta a função de flexibilidade e a sua utilização por métodos de controlo autónomo numa produção. Com esse objetivo, uma aplicação analógica numa prática industrial é observada para explorar os comportamentos destes métodos no controlo da produção.	Modelos APC com novos conceitos
S. Grundstein; S. Schukraft; S. Scholz-Reiter; M. Freitag	Evaluation system for autonomous control methods in coupled planning and control systems	Realiza um estudo sobre a possibilidade de integrar os métodos de controlo autónomo e planeamento central. A combinação é testada para verificar a capacidade da integração atingir os alvos logísticos pedidos. Sistema de avaliação desenvolvido que permite uma avaliação quantitativa através da operacionalização do nível de complexidade, autonomia e um vetor com indicadores de desempenho. Assim, é possível quantificar a força de integração entre os métodos.	Modelos APC com novos conceitos
S. Grundstein; S. Scholz-Reiter; M. Freitag	A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates	Apresenta os métodos AP, que integra todas as tarefas de controlo (ordem de lançamento, sequenciamento e capacidade de controlo), de modo a melhorar a data de entrega. O APC é avaliado com combinações de métodos usando a simulação, sendo que os resultados demonstram o potencial dos métodos para cumprir as datas de entrega.	Modelos APC com novos conceitos
S. Grundstein; S. Schukraft; S. Scholz-Reiter; M. Görges	An approach for applying autonomous production control methods with central production planning	Abordagem que promove a interligação entre os métodos de planeamento central e controlos autónomos de produção. Esta interligação promove as vantagens de ambas as abordagens, podendo ser combinadas de maneira eficiente. Assim, pode ser criado um plano de produção estável e capaz de lidar com influências.	Modelos APC com novos conceitos
S. Grundstein; S. Schukraft; S. Scholz-Reiter; M. Freitag	Coupling order release methods with autonomous control methods	Artigo que examina a influência dos métodos de controlo de lançamento na eficiência dos modelos de controlo autónomo através da avaliação teórica e simulação. Os resultados indicam uma alta influência geral dos métodos de controlo de lançamento no desempenho logístico	Modelos APC com novos conceitos
T. Jagalski; C. de Beer; M. Freitag	Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times	Nova estratégia de controlo autónomo que combina tempos de espera previstos com base nas informações locais dos níveis de carga e informação dos trabalhos anteriores, métodos das feromonas. A estratégia vai ser aplicada num cenário de produção com tempos de <i>setup</i> .	Comparação de métodos

T. Jagalski; B. Scholz-Reiter	Dynamics of Autonomous Control in Production Logistics	O artigo fornece uma visão geral da modelação e análise das estratégias de controlo autónomo para produção. O foco principal está na comparação dos efeitos das diferentes estratégias de controlo autónomo sobre o desempenho logístico do sistema e seu comportamento. Para alcançar este objetivo, a análise de sensibilidade é usada para comparar a robustez do sistema logístico enquanto as estratégias são trocadas	Comparação de métodos
A. Márkus; T. Kis Váncza; L. Monostori	A Market Approach to Holonic Manufacturing	O artigo introduz um mecanismo que coordena agentes inteligentes, os quais pretendem atingir os seus objetivos em sistemas altamente imprevisíveis. O modelo de mercado é usado para resolver o processamento dinâmico de pedidos e problemas de atrasos: os conflitos entre os agentes locais são resolvidos por negociações simples de tarefas comuns, datas de vencimento e preços.	Novo método
A Mehra; K.D. Thoben; B. Scholz-Reiter	Bridging lean to agile production logistics using autonomous carriers in pull flow	Estudo que cobre uma rápida revisão das técnicas <i>lean</i> e <i>agility</i> e destaca algumas contribuições específicas do controlo autónomo nestas técnicas. O objetivo é esclarecer o papel da autonomia no cumprimento dos objetivos das técnicas. Isso é concluído através do desenvolvimento de uma simulação com alguns cenários numa rede de abastecimento.	Modelos APC com novos conceitos
C. Ngxesha; O. Ncube; C. Ma	Complexity-oriented evaluation of production systems for online-switching of autonomous control methods	Avaliação dos parâmetros de complexidade que avaliam um sistema autónomo. Estes parâmetros são relacionados e é construída uma matriz, onde os mesmos são relacionados e são atribuídas ponderações.	Modelos APC com novos conceitos
P. Peeters; H. Van Brussel; P. Valckenaers; J. Wyns; L. Bongaerts; M. Kollingbaum; T. Heikkilä	Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops	Criado um modelo que permite responder a perturbações inesperadas do sistema. O modelo é inspirado no comportamento de insetos, sendo que a informação é transmitida na forma de feromonas, os trabalhos têm um poder de decidir a sua próxima consoante a informação deixada pelos seus antecessores.	Comparação de métodos
T. Philipp; C. de Beer; K. Windt; B. Scholz-Reiter	Evaluation of Autonomous Logistic Processes – Analysis of the Influence of Structural Complexity Department of Planning and Control of Production Systems	Artigo que fornece uma definição global de controlo autónomo no contexto do <i>Collaborative Research Center</i> . Desenvolve um sistema que permite avaliar a complexidade de um sistema e uma abordagem vetorial que determina a obtenção dos objetivos logísticos. São usados dois métodos de controlo autónomo que avaliam se estes sistemas lidam com o aumento de complexidade.	Comparação de métodos Sistema de avaliação
H. Rekersbrink; T. Makuschewitz; B. Scholz-Reiter	A distributed routing concept for vehicle routing problems	As soluções tradicionais para problemas de rotas de veículos já não conseguem lidar com o aumento da dinâmica presente nos sistemas. Com esse objetivo, foi introduzido um método que permite que os trabalhos e veículos de um sistema tomem decisões em função da crescente dinâmica nos sistemas, sendo que cada um dos objetos tem capacidade para tomar decisões de maneira independente. Este método é avaliado em condições estáticas e dinâmicas.	Comparação de métodos

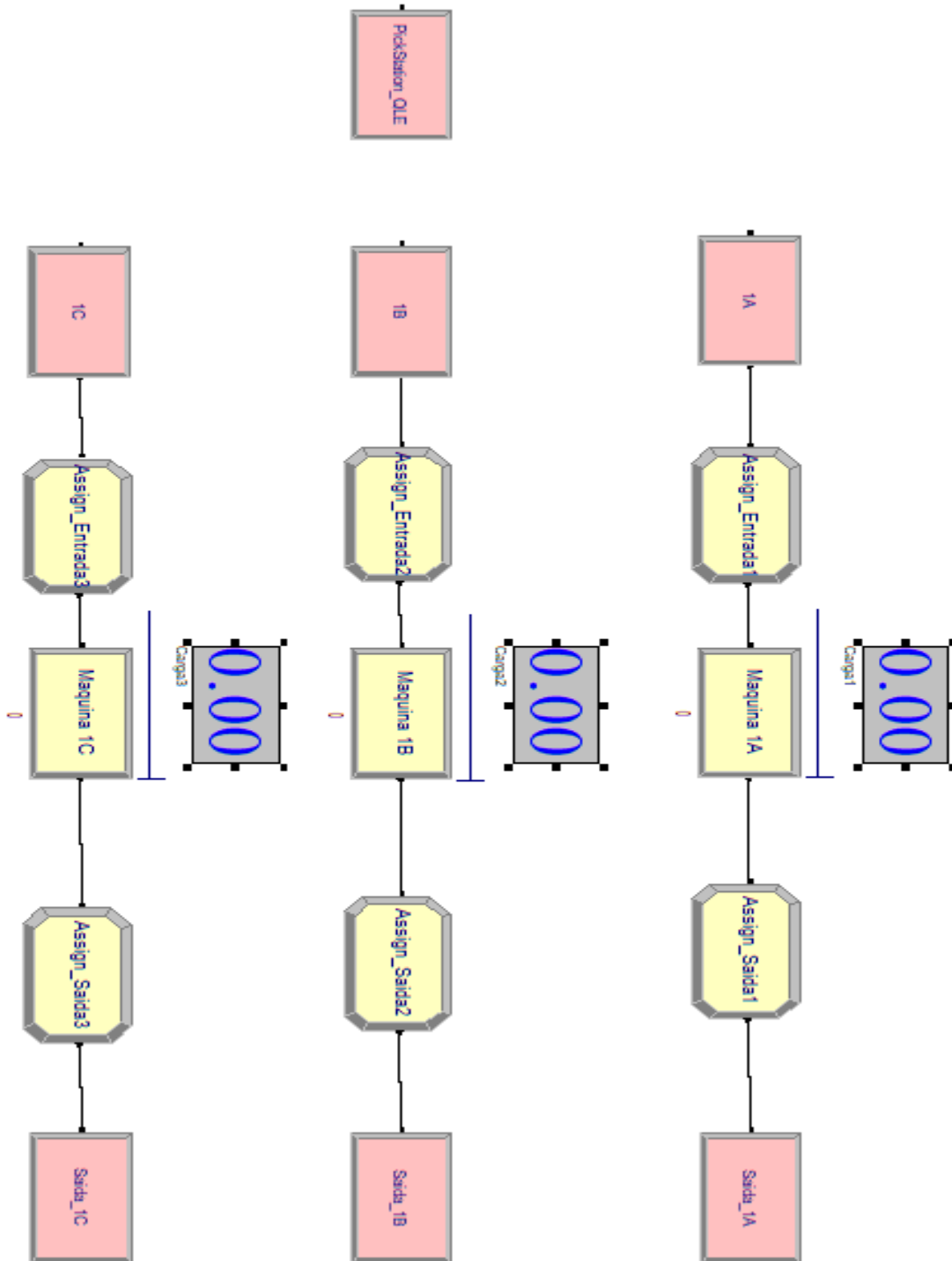
H. Rekersbrink; B. Scholz-Reiter; C. Zabel	An autonomous control concept for production logistics.	Apresenta um novo método baseado em redes de comunicação e transporte, permite que os objetos, ordens de produção e máquinas tomem decisões e decidam as suas rotas de produção baseadas nas informações disponíveis no momento e local.	Comparação de métodos
P. Renna	Job shop scheduling by pheromone approach in a dynamic environment	Sistema <i>job shop</i> , sendo a programação criada por uma abordagem baseada no método das feromonas. Foi desenvolvido um ambiente de simulação no ARENA, usado para implementar as abordagens e avaliar as medidas de desempenho. Foram considerados cenários estáticos e dinâmicos, tendo sido comparado com um método de coordenação central.	Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; C. de Beer; M. Freitag; T. Jagalski	Bio-inspired and pheromone-based shop-floor control	O método das feromonas é aplicado num ambiente de produção e o seu desempenho é comparado com um método anteriormente desenvolvido, através da análise de estatísticas e tempos de processamento, para diferentes situações de procura dinâmica.	Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; M. Freitag	Autonomous Processes in Assembly Systems	Apresenta os princípios gerais de autonomia, conceitos, métodos e tecnologias propostos para aplicar os sistemas autónomos em sistemas de montagem. Diferentes abordagens para operações autónomas em sistemas de montagem são explicadas e as tendências futuras para os componentes, peças e produtos deste tipo de sistema são discutidos.	Modelos APC com novos conceitos
B. Scholz-Reiter; C. de Beer; M. Freitag; T. Jagalski	Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control	Introduzida a ideia de processos logísticos autónomos e desenvolvido um modelo de simulação dinâmico de um ambiente de produção com controlo autónomo e central. Esta simulação permite avaliar as dinâmicas do sistema em diversas cargas de trabalho, sendo que a principal medida de desempenho é o tempo de processamento, para diferentes situações e perturbações do sistema.	Controlo autónomo vs Planeamento Central
B. Scholz-Reiter; C. de Beer; M. Freitag; T. Jagalski	The Influence of Production Networks' Complexity on the Performance of Autonomous Control Methods	Analisa a influência da complexidade estrutural de uma rede de produção na performance de dois métodos autónomos de controlo de produção. Os mesmos são avaliados em diferentes níveis de complexidade e os seus comportamentos são comparados através dos tempos de processamento.	Novo método Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; C. de Beer; M. Freitag; T. Jagalski	Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches.	São comparados duas abordagens diferentes para descrever um cenário de controlo autónomo de produção. Uma estratégia é desenvolvida, a eficácia e robustez são testadas para analisar o comportamento do sistema para diferentes cargas de trabalho e perturbações inesperadas.	Sistema de avaliação
B. Scholz-Reiter; M. Görge; T. Jagalski	Logistic Systems with Multiple Autonomous Control Strategies	Implementação de controlo autónomo como uma regra de serviço num cenário FFS com uma programação baseada no método das feromonas. O principal objetivo é demonstrar que diversas estratégias APC num único sistema logístico podem gerar mau comportamento e mau desempenho geral.	Comparação de métodos

B. Scholz-Reiter; M. Görges; T. Jagalski; A. Mehrsai	Modelling and analysis of autonomously controlled production networks	Apresentado um modelo dinâmico de uma rede de produção com instalações geograficamente dispersas e horários de transporte fixos. Investiga a influência dos métodos de controlo autónomo nos processos integrados de produção e transporte e mostra que a aplicação destes métodos pode melhorar o tratamento das dinâmicas internas e externas.	Controlo autónomo vs Planeamento Central Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; M. Görges; T. Philipp	Autonomously controlled production systems- Influence of autonomous control level on logistic performance	Diferentes níveis de controlo autónomo e estratégias de controlo são avaliados. O sistema de avaliação relaciona o nível de obtenção dos objetivos logísticos com o nível de complexidade e o nível de controlo autónomo. Com base em dados reais de produção, modelos de simulação foram construídos. Foram estudados diversos níveis de controlo autónomo e para cada um desses níveis, três métodos são implementados e comparados entre si e com um método convencional.	Controlo autónomo vs Planeamento Central Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; J.C. Bendul; T. Jagalski	Autonomous Control of a Shop Floor Based on Bee's Foraging Behaviour	Aplicação do método Bee foraging (Bee) num ambiente de produção com tempos de <i>setup</i> . Através de uma simulação, o desempenho do sistema é avaliado no impacto nos tempos de processamento e níveis de inventário	Novo método
B. Scholz-Reiter; H. Rekersbrink; M. Freitag	Internet routing protocols as an autonomous control approach for transport networks	Os protocolos de roteamento existentes nas redes de comunicação são transmitidos para problemas de transporte. As diferenças estruturais não permitem que os protocolos sejam transmitidos diretamente, sendo necessário uma correta adaptação apresentada no artigo.	Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; H. Rekersbrink; M. Görges	Dynamic flexible flow shop problems - Scheduling heuristics vs. autonomous control.	São utilizados dois métodos de controlo autónomo aplicados em problemas numa FFS. Com o intuito de avaliar estes métodos, várias heurísticas de escalonamento e um algoritmo genérico são tidos como referência. Diversos problemas são tidos em conta e os métodos centrais e APC são avaliados.	Controlo autónomo vs Planeamento Central
B. Scholz-Reiter; M. Görges; T. Jagalski; L. Naujok	Modelling and analysis of an autonomous control method based on bacterial chemotaxis.	Introduzido o método Bacterial Chemotaxis (CHE), baseado no comportamento desta bactéria. Analisado sobre diversos parâmetros e simulado num cenário de produção de maneira a investigar a performance num ambiente complexo,	Novo método
B. Scholz-Reiter; S. Dashkovskiy M. Görges; L. Naujok	Stability analysis of autonomously controlled production networks	Neste artigo é apresentada uma análise da estabilidade de redes de produção controladas de maneira autónoma, do ponto de vista da matemática e da engenharia. A dinâmica da rede é modelada através de equações diferenciais e através da simulação. São utilizados dois métodos e o objetivo é calcular as condições de estabilidade através da teoria matemática, identificar uma região de estabilidade e refinar a mesma através da simulação.	Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; T. Jagalski	Modelling Autonomous Control in Production Logistics	Fornecer uma visão geral da modelação de estratégias de controlo autónomo em sistemas logísticos. É utilizado um cenário de produção com e sem tempos de <i>setup</i> , para uma série de estratégias baseadas no modelo das feromonas.	Comparação de métodos

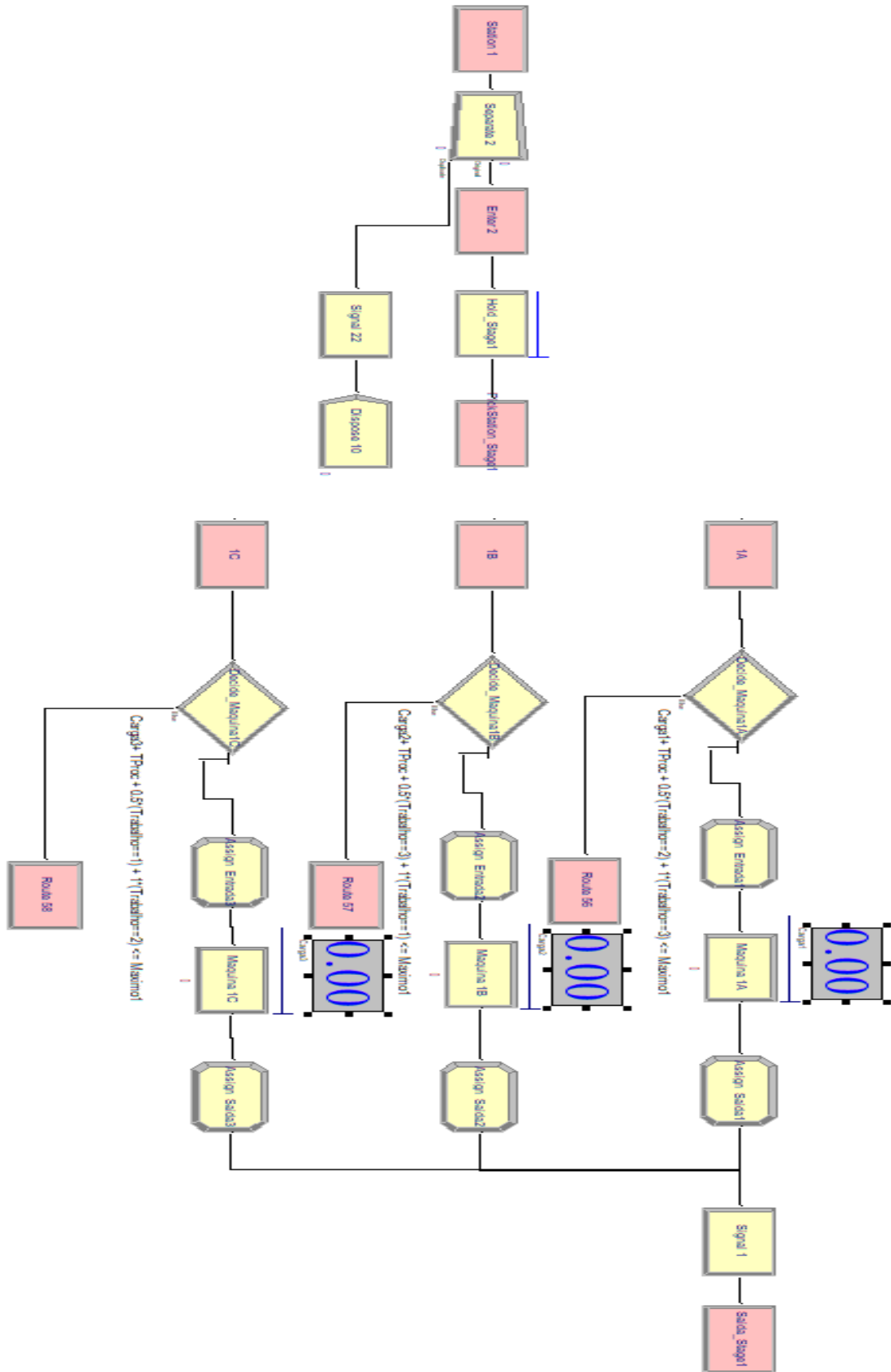
B. Scholz-Reiter; H. Karimi; N. Duffie; T. Jagalski	Bio-inspired capacity control for production networks with autonomous work systems.	Analisa o comportamento e performance de dois métodos inspirados na natureza: PHE e BEE. Desempenho medido através da simulação baseada em dados reais.	Comparação de métodos
B. Scholz-Reiter; D. Rippel; S. Sowade	A Concept for Simulation of Autonomous Logistic Processes.	Este artigo apresenta um conceito, para transformar os modelos de processo em modelos de simulação possíveis de executar. Apresenta um procedimento para selecionar e analisar plataformas de simulação adequadas.	Sistema de avaliação
S. Schukraft; s. Grundstein; B. Scholz-Reiter; M. Freitag	Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control.	Descreve uma abordagem de avaliação para a identificação de maneiras de interligar os métodos de planeamento central e os de controlo autónomo. A avaliação considera a adequação dos métodos para aplicação em ambientes de produção específicos, sendo utilizados diversos modelos centrais e autónomos e são interligados, para avaliar a possibilidade.	Sistema de avaliação
K. Ueda; I. Hatono; N. Fujii; J. Vaario	Reinforcement learning approaches to Biological Manufacturing System.	Descreve um reforço da aprendizagem das abordagens do método BMS, a fim de lidar com os vários objetivos globais complexos, sendo a sua eficácia medida através de simulação.	Novo método
H. Van Brussel; J. Wyns; P. Valckenaers; L. Bongaerts; P. Peeters	Reference architecture for holonic manufacturing systems	Artigo dá uma visão geral da arquitetura do método Holonic para sistemas de produção.	Comparação de métodos
B. Wenning; H. Rekersbrink; A. Timmgel	Autonomous control by means of distributed routing.	Apresentado o método DLRP, um conceito de roteamento para ambientes logísticos e dinâmicos. Foi aplicado num ambiente de simulação para avaliar a sua viabilidade.	Novo método
K. Windt; T. Philipp; F. Böse; T. Becker	Application of a three-component evaluation system for autonomous control in logistics	Determinadas as limitações da autonomia através de um sistema de avaliação. No sistema, são criados três componentes (nível de complexidade, nível de controlo autónomo e obtenção dos objetivos logísticos) e combinados para analisar o potencial do controlo autónomo. O potencial é visualizado através do resultado do procedimento de avaliação com a ajuda de um diagrama de 3 dimensões, sendo que os limites são medidos e determinados.	Sistema de avaliação
K. Windt; T. Becker; I. Kolev	A comparison of the logistics performance of autonomous control methods in production logistics.	Comparados diferentes métodos de controlo autónomo usando uma simulação de uma lavagem de carros.	Comparação de métodos
K. Windt; T. Becker; O. Jeken; A. Gelessus	A classification pattern for autonomous control methods in logistics.	Artigo que define o que são os métodos de controlo autónomo, trabalha as suas características fundamentais, apresenta múltiplos métodos desenvolvidos até ao momento que o autor escreveu o artigo e compara os mesmos em relação a características e desempenho.	Novo método Comparação de métodos Sistema de avaliação
K. Windt, F. Böse; T. Philipp	Criteria and Application of Autonomous Cooperating Logistic Processes	Introduz uma definição geral para controlo autónomo e o seu significado no contexto logístico. Baseado neste facto, é desenvolvido um catálogo de critérios que assegura a identificação dos processos autónomos e a respetiva distinção para os métodos de planeamento central.	Sistema de avaliação

K. Windt, F. Böse; t. Philipp	Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application	Introduz uma definição geral para controlo autónomo e o seu significado no contexto logístico. Baseado neste facto, é desenvolvido um catálogo de critérios que assegura a identificação dos processos autónomos e a respetiva distinção para os métodos de planeamento central.	Sistema de avaliação
K. Windt; M. Hülsmann	Changing Paradigms in Logistics – Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control.	Apresenta definições de controlo autónomo e abordagens iniciais e resultados destes modelos para processos logísticos.	Sistema de avaliação
K. Windt; T. Becker	Applying Autonomous Control Methods in Different Logistic Processes – A Comparison by Using an Autonomous Control Application Matrix	Introduz uma Matriz de Aplicação do Controlo Autónomo que permite identificar o método de controlo autónomo que mais se adequa melhor a um determinado objetivo logístico. A matriz contém valores de performance atual, percentagem desempenho e ordena cada método em combinação com um processo específico.	Sistema de avaliação
B. Scholz-Reiter; A. Mehrsai	Superior Performance of Legible Supply Networks by Application of Autonomous Control	Abordagem para avaliar o fluxo de materiais numa rede de abastecimento, baseado nos princípios de <i>Lean</i> e <i>agility</i> . O desempenho é avaliado através de uma avaliação.	Controlo autónomo vs Planeamento Central Modelos APC com novos conceitos

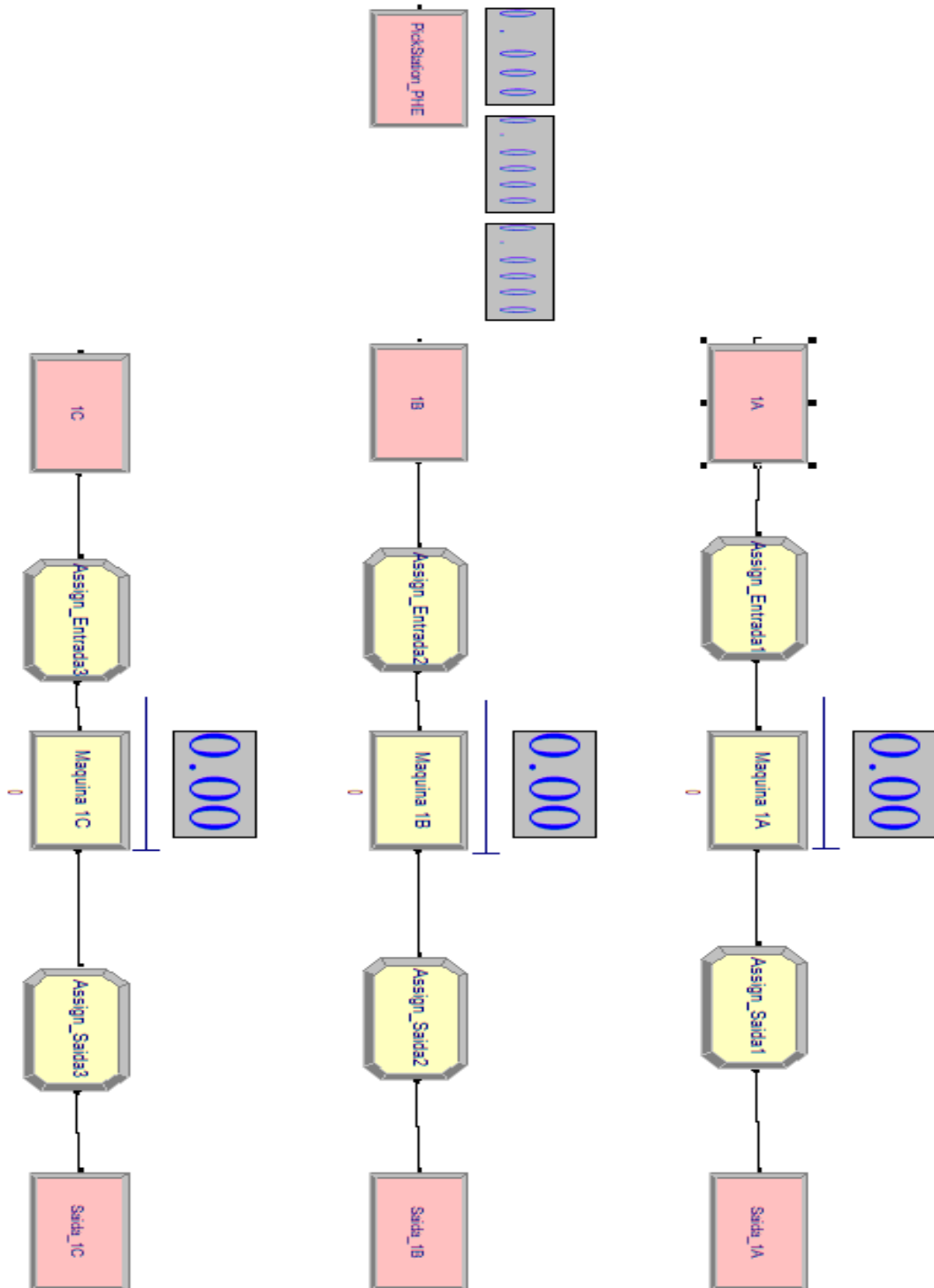
APÊNDICE II - Representação do estágio produtivo no QLE



APÊNDICE III - Representação do estágio produtivo no DWL



APÊNDICE IV – Representação do estágio produtivo no PHE



APÊNCICE V – Resultados obtidos para todos os cenários

**QLE (Queue Length Estimator)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	11,18	0,08 -0,08	10,88	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06
	EDD / FCFS	11,18	0,08 -0,08	10,88	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06
	FCFS / EDD	11,18	0,08 -0,08	10,87	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06	10,88	0,06 -0,06
	FCFS / FCFS	11,18	0,08 -0,08	10,87	0,06 -0,06	10,87	0,06 -0,06	10,88	0,06 -0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	9,22	0,01 -0,01	10,02	0,02 -0,02	10,47	0,04 -0,04	10,87	0,06 -0,06
	EDD / FCFS	9,22	0,01 -0,01	10,02	0,02 -0,02	10,47	0,04 -0,04	10,87	0,06 -0,06
	FCFS / EDD	9,22	0,01 -0,01	10,02	0,02 -0,02	10,47	0,04 -0,04	10,88	0,06 -0,06
	FCFS / FCFS	9,22	0,01 -0,01	10,02	0,02 -0,02	10,47	0,04 -0,04	10,88	0,06 -0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	9,94	0,54 -0,54	8,06	0,42 -0,42	8,07	0,43 -0,43	8,06	0,41 -0,41
	EDD / FCFS	9,94	0,54 -0,54	8,06	0,42 -0,42	8,07	0,43 -0,43	8,06	0,41 -0,41
	FCFS / EDD	9,96	0,54 -0,54	8,04	0,42 -0,42	8,10	0,42 -0,42	8,09	0,41 -0,41
	FCFS / FCFS	9,96	0,54 -0,54	8,04	0,42 -0,42	8,10	0,42 -0,42	8,09	0,41 -0,41

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	-5	0,08 -0,08	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06
	EDD / FCFS	-5	0,08 -0,08	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06
	FCFS / EDD	-5	0,08 -0,08	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06
	FCFS / FCFS	-5	0,08 -0,08	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06	-6	0,06 -0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	0,37	0,04 -0,04	0,26	0,03 -0,03	0,25	0,03 -0,03	0,26	0,03 -0,03
	EDD / FCFS	0,37	0,04 -0,04	0,26	0,03 -0,03	0,25	0,03 -0,03	0,26	0,03 -0,03
	FCFS / EDD	0,37	0,04 -0,04	0,25	0,03 -0,03	0,25	0,03 -0,03	0,26	0,03 -0,03
	FCFS / FCFS	0,37	0,04 -0,04	0,25	0,03 -0,03	0,25	0,03 -0,03	0,26	0,03 -0,03

### DWL (Direct Workload)

TTT (horas)		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	10,85	0,07	10,61	0,05	11,08	0,07	10,87	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06
	EDD / FCFS	10,85	0,07	10,61	0,05	11,07	0,07	10,87	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06
	FCFS / EDD	10,85	0,07	10,61	0,05	11,08	0,07	10,88	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06
	FCFS / FCFS	10,85	0,07	10,61	0,05	11,07	0,07	10,88	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06

TT (horas)		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	9,10	0,01	9,89	0,02	10,60	0,04	10,87	0,06
			-0,01		-0,02		-0,04		-0,06
	EDD / FCFS	9,10	0,01	9,89	0,02	10,59	0,04	10,87	0,06
			-0,01		-0,02		-0,04		-0,06
	FCFS / EDD	9,10	0,01	9,89	0,02	10,60	0,04	10,88	0,06
			-0,01		-0,02		-0,04		-0,06
	FCFS / FCFS	9,10	0,01	9,89	0,02	10,59	0,04	10,88	0,06
			-0,01		-0,02		-0,04		-0,06

PTAtraso (%)		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	8,59	0,50	6,51	0,35	9,39	0,47	8,06	0,41
			-0,50		-0,35		0,47		-0,41
	EDD / FCFS	8,68	0,48	6,52	0,35	9,31	0,47	8,06	0,41
			-0,48		-0,35		-0,47		-0,41
	FCFS / EDD	8,59	0,50	6,51	0,35	9,39	0,47	8,09	0,41
			-0,50		-0,35		0,47		-0,41
	FCFS / FCFS	8,68	0,48	6,52	0,35	9,31	0,47	8,09	0,41
			-0,48		-0,35		-0,47		-0,41

Lateness (horas)		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	-6	0,08	-6	0,05	-5	0,07	-6	0,06
			-0,08		-0,05		-0,07		-0,06
	EDD / FCFS	-6	0,07	-6	0,05	-5	0,07	-6	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06
	FCFS / EDD	-6	0,08	-6	0,05	-5	0,07	-6	0,06
			-0,08		-0,05		-0,07		-0,06
	FCFS / FCFS	-6	0,07	-6	0,05	-5	0,07	-6	0,06
			-0,07		-0,05		-0,07		-0,06

Tardiness (horas)		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	0,30	0,03	0,19	0,02	0,33	0,03	0,26	0,03
			-0,03		-0,02		-0,03		-0,03
	EDD / FCFS	0,31	0,03	0,19	0,02	0,32	0,03	0,26	0,03
			-0,03		-0,02		-0,03		-0,03
	FCFS / EDD	0,30	0,03	0,19	0,02	0,33	0,03	0,26	0,03
			-0,03		-0,02		-0,03		-0,03
	FCFS / FCFS	0,31	0,03	0,19	0,02	0,32	0,03	0,26	0,03
			-0,03		-0,02		-0,03		-0,03

### PHE (Pheromone)

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	271,6	13,58	81,76	7,91	36,08	2,45	23,53	0,38
			-13,6		-7,91		2,45		-0,38
	EDD / FCFS	271,6	13,58	81,76	7,91	36,08	2,45	23,53	0,38
			-13,6		-7,91		2,45		-0,38
	FCFS / EDD	265,9	13,87	76,09	7,32	34,47	2,14	23,21	0,37
			-13,9		-7,32		-2,14		-0,37
	FCFS / FCFS	265,9	13,87	76,09	7,32	34,47	2,14	23,21	0,37
			-13,9		-7,32		-2,14		-0,37

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	11,47	0,00	13,83	0,02	15,81	0,06	23,53	0,38
			0,00		-0,02		-0,06		-0,38
	EDD / FCFS	11,47	0,00	13,83	0,02	15,81	0,06	23,53	0,38
			0,00		-0,02		-0,06		-0,38
	FCFS / EDD	11,46	0,00	13,81	0,02	15,76	0,06	23,21	0,37
			0,00		-0,02		-0,06		-0,37
	FCFS / FCFS	11,46	0,00	13,81	0,02	15,76	0,06	23,21	0,37
			0,00		-0,02		-0,06		-0,37

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	99,96	0,07	94,86	1,31	81,67	1,56	66,47	0,94
			-0,07		1,31		-1,56		-0,94
	EDD / FCFS	99,96	0,07	94,86	1,31	81,67	1,56	66,47	0,94
			-0,07		1,31		-1,56		-0,94
	FCFS / EDD	99,94	0,10	94,12	1,38	79,19	1,63	59,94	0,86
			-0,10		-1,38		-1,63		-0,86
	FCFS / FCFS	99,94	0,10	94,12	1,38	79,19	1,63	59,94	0,86
			-0,10		-1,38		-1,63		-0,86

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	255,1	13,58	65,26	7,91	19,58	2,45	7,034	0,38
			-13,6		-7,91		-2,45		-0,38
	EDD / FCFS	255,1	13,58	65,26	7,91	19,58	2,45	7,034	0,38
			-13,6		-7,91		-2,45		-0,38
	FCFS / EDD	249,4	13,87	59,59	7,32	17,97	2,14	6,709	0,37
			-13,9		7,32		-2,14		-0,37
	FCFS / FCFS	249,4	13,87	59,59	7,32	17,97	2,14	6,709	0,37
			-13,9		7,32		-2,14		-0,37

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	255,1	13,58	65,50	7,87	20,46	2,39	8,72	0,34
			-13,6		-7,87		-2,39		-0,34
	EDD / FCFS	255,1	13,58	65,50	7,87	20,46	2,39	8,72	0,34
			-13,6		-7,87		-2,39		-0,34
	FCFS / EDD	249,4	13,87	59,87	7,28	18,99	2,08	8,72	0,32
			-13,9		-7,28		-2,08		-0,32
	FCFS / FCFS	249,4	13,87	59,87	7,28	18,99	2,08	8,72	0,32
			-13,9		-7,28		-2,08		-0,32

**RANDOM**

		Número de trabalhos lançados no sistema					
		12	15	18	Infinito		
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	11,18	10,25	10,87	37,97	0,76	-0,76
	EDD / FCFS	11,18	10,25	10,87	37,97	0,76	-0,76
	FCFS / EDD	11,18	10,25	10,87	37,34	0,72	-0,72
	FCFS / FCFS	11,18	10,25	10,87	37,34	0,72	-0,72

		Número de trabalhos lançados no sistema					
		12	15	18	Infinito		
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	8,22	10,07	10,47	37,97	0,76	-0,76
	EDD / FCFS	8,22	10,07	10,47	37,97	0,76	-0,76
	FCFS / EDD	8,22	10,07	10,47	37,34	0,72	-0,72
	FCFS / FCFS	8,22	10,07	10,47	37,34	0,72	-0,72

		Número de trabalhos lançados no sistema					
		12	15	18	Infinito		
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	8,94	8,06	8,07	91,33	0,39	-0,39
	EDD / FCFS	8,94	8,06	8,07	91,33	0,39	-0,39
	FCFS / EDD	8,26	8,04	8,10	87,74	0,44	-0,44
	FCFS / FCFS	8,26	8,04	8,10	87,74	0,44	-0,44

		Número de trabalhos lançados no sistema					
		12	15	18	Infinito		
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	5	6	6	21,79	0,74	-0,74
	EDD / FCFS	5	6	6	21,79	0,74	-0,74
	FCFS / EDD	5	6	6	20,84	0,72	-0,72
	FCFS / FCFS	5	6	6	20,84	0,72	-0,72

		Número de trabalhos lançados no sistema					
		12	15	18	Infinito		
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	EDD / EDD	0,37	0,26	0,25	21,47	0,76	-0,76
	EDD / FCFS	0,37	0,26	0,25	21,47	0,76	-0,76
	FCFS / EDD	0,37	0,25	0,25	21,29	0,70	-0,70
	FCFS / FCFS	0,37	0,25	0,25	21,29	0,70	-0,70

**DWL - 2 (Direct Workload)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / EDD	9,64	0,04						
			-0,04						
	FCFS / FCFS	9,65	0,04	12,14	0,12	10,21	-0,04	10,88	0,06
			-0,04		-0,12		-0,04		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / EDD	8,60	0,01						
			-0,01						
	FCFS / FCFS	8,61	0,01	10,53	0,03	9,98	0,03	10,88	0,06
			-0,01		-0,03		-0,03		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / EDD	3,36	0,26						
			-0,26						
	FCFS / FCFS	3,47	0,26	16,01	0,74	5,35	0,25	8,09	0,41
			-0,26		-0,74		-0,25		-0,41

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / EDD	-6	0,08						
			-0,08						
	FCFS / FCFS	-7	0,04	-4	0,12	-6	0,04	-6	0,06
			-0,04		-0,12		-0,04		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / EDD	0,09	0,01						
			-0,01						
	FCFS / FCFS	0,09	0,01	0,72	0,07	0,15	0,01	0,26	0,03
			-0,01		-0,07		-0,01		-0,03

**DWL - 2.5 (Direct Workload)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	12,32	0,13	10,29	0,05	10,60	0,05	10,88	0,06
			-0,13		-0,05		-0,05		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	9,45	0,02	9,69	0,02	10,28	0,03	10,88	0,06
			-0,02		-0,02		-0,03		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	17,09	0,81	5,60	0,29	6,52	0,35	8,09	0,41
			0,81		-0,29		-0,35		-0,41

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	-4	0,13	-6	0,05	-6	0,05	-6	0,06
			-0,13		-0,05		-0,05		-0,06

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	0,83	0,08	0,15	0,02	0,19	0,02	0,26	0,03
			-0,08		-0,02		-0,02		-0,03

**PHE - 0.1 (Pheromone)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	315,3	14,44	128,6	11,02	55,37	5,32	27,14	0,49
			-14,44		-11,02		-5,32		-0,49

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	11,54	0,00	14,01	0,01	16,29	0,05	27,14	0,49
			0,00		-0,01		-0,05		-0,49

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	99,95	0,06	98,00	0,75	89,98	1,52	66,90	0,84
			-0,06		-0,75		-1,52		-0,84

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	298,8	14,44	112,1	11,02	38,87	5,32	10,64	0,49
			-14,44		-11,02		-5,32		-0,49

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	298,8	14,44	112,2	11	39,35	5,26	12,33	0,44
			-14,44		-11		-5,26		-0,44

**PHE - 0.3 (Pheromone)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	285,9	14,03	94,8	9,19	39,46	2,98	24,18	0,38
			-14,03		-9,19		-2,98		-0,38

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	11,50	0,00	13,89	0,02	15,95	0,05	24,18	0,38
			0,00		-0,02		-0,05		-0,38

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	99,97	0,04	95,96	1,21	82,89	1,62	62,18	0,84
			-0,04		-1,21		-1,62		-0,84

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	269,4	14,03	78,27	9,19	22,96	2,98	7,68	0,38
			-14,03		-9,19		-2,98		-0,38

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	269,4	14,03	78,46	9,16	23,79	2,92	9,59	0,34
			-14,03		-9,16		-2,92		-0,34

**PHE - 0.7 (Pheromone)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	252,8	13,32	67,9	6,79	32,60	1,82	22,92	0,38
		-13,32	-13,32		-6,79		-1,82		-0,38

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	11,44	0,00	13,76	0,02	15,65	0,06	22,92	0,38
		0,00	-13,32		-0,02		-0,06		-0,38

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	99,87	0,14	92,35	1,51	77,12	1,66	58,91	0,88
		-0,14	-1,51		-1,66		-0,88		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	236,3	13,32	51,37	6,79	16,10	1,82	6,42	0,38
		-13,32	-6,79		-1,82		-0,38		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	236,4	13,32	51,73	6,74	17,22	1,75	8,48	0,34
		-13,32	-6,74		-1,75		-0,34		

**PHE - 0.9 (Pheromone)**

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	244,9	13,78	64,8	6,54	32,44	1,9	22,79	0,36
		-13,78	-6,54		-1,9		-0,36		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	11,43	0,00	13,74	0,03	15,63	0,06	22,79	0,36
		0,00	-0,03		-0,06		-0,36		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	99,87	0,14	91,99	1,55	76,89	1,65	58,48	0,88
		-0,14	-1,55		-1,65		-0,88		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	228,4	13,78	48,33	6,54	17,08	1,9	6,29	0,36
		-13,78	-6,54		-1,9		-0,36		

		Número de trabalhos lançados no sistema							
		12		15		18		Infinito	
Regras de sequenciação (Máquinas / pool)	FCFS / FCFS	228,4	13,78	48,70	6,49	17,08	1,83	8,38	0,32
		-13,78	-6,49		-1,83		-0,32		

