



DUAL RESOURCE CONSTRAINED EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL: ESTUDO DE SIMULAÇÃO

FILIFE ARCHER CORTE-REAL RODRIGUES

novembro de 2020

DUAL RESOURCE CONSTRAINT EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL: ESTUDO DE SIMULAÇÃO

Filipe Archer Côrte-Real Rodrigues



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2020

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, ramo de Sistemas e Planeamento Industrial

Candidato: Filipe Archer Côrte-Real Rodrigues, Nº 1110354, 1110354@isep.ipp.pt

Orientador: Professor Doutor Luis Pinto Ferreira, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Co-Orientador: Professor Doutor Nuno Octávio Fernandes, Instituto Politécnico de Castelo Branco.



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

28 de outubro de 2020

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer aos meus orientadores, Prof. Dr. Luís Ferreira do Instituto Superior de Engenharia do Porto e Prof. Dr. Nuno Octávio Fernandes do Instituto Politécnico de Castelo Branco, por todo o auxílio prestado na realização desta dissertação, tanto ao nível dos conceitos teóricos necessários, como na execução prática dos mesmos.

Agradeço também a todas as pessoas (professores/colegas) que partilharam o seu conhecimento e que de alguma forma me ajudaram a chegar aqui e ao ISEP por ter contribuído de forma essencial para a minha formação, tanto a nível académico, como a nível humano.

Também quero agradecer aos meus pais pela paciência e força transmitida ao longo deste ano, maioritariamente atípico e difícil para todos. Agradecer á minha avó por também acompanhar de perto o meu percurso, desde o primeiro ano e ao resto da minha família.

E, por fim, aos meus amigos mais próximos por me terem acompanhado nos bons e nos maus momentos.

Resumo

Os sistemas de produção industrial são limitados por diversas categorias de recursos: pessoas, máquinas, ferramentas, sistemas de transporte, entre outras. Na terminologia anglo-saxónica é comum usar o termo *Dual Resource Constrained* (DRC), para designar sistemas limitados pela disponibilidade destes tipos de recursos, usualmente pessoas e máquinas. O desempenho de sistemas do tipo DRC é determinado por diversos fatores, nomeadamente pela forma de como os recursos humanos (trabalhadores) são alocados às máquinas (i.e., regras de alocação dos trabalhadores) e pela sequência pela qual os trabalhos são processados nessas máquinas (i.e., regras de despacho). Este trabalho utiliza um ambiente produtivo virtual, com recurso ao software de simulação discreta Arena, para avaliar um conjunto de regras de alocação de trabalhadores e de regras de despacho na operação de sistemas DRC. No estudo são considerados vários cenários experimentais, analisando o impacto destas regras em diferentes configurações dos sistemas de produção. De uma forma geral, os resultados obtidos permitiram concluir que as regras testadas para alocação dos trabalhadores às máquinas têm um forte impacto na *performance* do sistemas produção testados, nomeadamente no que se refere à definição para onde os trabalhadores se devem deslocar (*where rules*). O estudo procura ainda apontar possíveis caminhos de trabalho futuro para a melhoria do desempenho deste tipo de sistemas de produção.

Palavras-Chave

Sistemas de produção DRC, Simulação discreta, *Software Arena*, VBA.

Abstract

Industrial production systems are usually constrained by two major resource categories: workers, machines, tools, transportation systems and others. In the Anglo-Saxon terminology, it is usual to use the term Dual Resource Constrained (DRC), to define systems constrained by machines and workers. Their performance is determined by numerous causes: How the workers are allocated to the machines and the order in which the jobs should be processed are some examples. This project uses a virtual production environment, by accessing a discrete simulation software called Arena. It is used to evaluate a set of rules that determine the way workers should move and the order of the jobs being processed in a DRC system. In this paper, are several different scenarios with several rules being analyzed. The results of this project allowed to conclude that between the several tested rules, the ones that command the way workers should move (where rules) had a major impact in the system's performances. This study also tried to point possible future ways to improve the performance of these kinds of systems.

Keywords

DRC production systems, Discrete event simulation, Arena software, VBA.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. DRC: REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. TRABALHO DESENVOLVIDO	5
2.2. DRC EM AMBIENTES DE CONTROLO DE CARGA.....	8
2.3. LANÇAMENTO.....	10
2.4. DESPACHO	12
2.5. FLEXIBILIDADE DO TRABALHADOR	13
2.6. AFETAÇÃO DE TRABALHADORES	14
2.7. OUTROS FATORES.....	15
3. ESTUDO DE SIMULAÇÃO	18
3.1. <i>SOFTWARE</i> DE SIMULAÇÃO USADO	18
3.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO	18
3.3. POLÍTICAS DE CONTROLO	32
3.4. PLANO EXPERIMENTAL E ÍNDICADORES DE DESEMPENHO.....	44
4. RESULTADOS E ANÁLISE	50
4.1. RESULTADOS PARA <i>ESTÁGIO ÚNICO COM MÁQUINAS PARALELAS</i>	50
4.2. RESULTADOS PARA A <i>LINHA PURA COM MÁQUINAS PARALELAS (PURE FLOW SHOP)</i>	51
4.3. RESULTADOS PARA A LINHA GENÉRICA COM MÁQUINAS PARALELAS (<i>FLEXIBLE FLOW SHOP</i>)	53
4.4. IMPACTO DO NÍVEL DE DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS – MTBF = 100 UNIDADES DE TEMPO; MTTR = 1 UNIDADE DE TEMPO (1º PADRÃO DE AVARIAS).....	54
4.5. IMPACTO DO NÍVEL DE DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS – MTBF = 400 UNIDADES DE TEMPO; MTTR = 4 UNIDADES DE TEMPO (2º PADRÃO DE AVARIAS)	56

4.6.	IMPACTO DA MOVIMENTAÇÃO DOS OPERÁRIOS NA OCORRÊNCIA DE AVARIAS	60
5.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO	65
5.1.	CONCLUSÕES.....	65
5.2.	PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO.....	66
	BIBLIOGRAFIA.....	69
	ANEXOS.....	74

Índice de Figuras

Figura 1 – <i>Workload Control</i> adaptado de Land & Gaalman (1995).....	9
Figura 2 – Problemas abordados pelos sistemas DRC, adaptado de Xu (2013).	10
Figura 3 – Controlo da informação/matérias-primas, adaptado de Salum & Araz (2009).....	11
Figura 4 – Exemplo de um dos modelos de Estágio único com máquinas paralelas.	21
Figura 5 – Chegada e lançamento.	21
Figura 6 – Estágio de produção.....	22
Figura 7 – Cálculo de indicadores e expedição.....	23
Figura 8 – Linha Pura.....	23
Figura 9 – Lançamento dos trabalhos, atribuição de operações e estações.....	24
Figura 10 – Atribuição do número de operações por trabalho.	25
Figura 11 – Atribuição de estações de trabalho.	26
Figura 12 – Condições para 3 operações.....	26
Figura 13 – Seleção do estágio e lançamento para a linha.....	27
Figura 14 – Separação dos trabalhos pelo número de operações.	28
Figura 15 – Bloco PICKSTATION 3.....	28
Figura 16 – Linha genérica.....	29
Figura 17 – Decremento do número de operações.	30
Figura 18 – Condições de escolha das estações.	30
Figura 19 – Condições e verificação do número de operações.	31
Figura 20 – Recolha de dados relativos às medidas de desempenho e expedição.	31
Figura 21 – Definição dos recursos nos modelos.....	33
Figura 22 – Bloco VBA.	34
Figura 23 – Definição do tempo de processamento de cada trabalho.	35
Figura 24 – Tempo de espera de cada trabalho.....	37
Figura 25 – Ordenação dos despachos (FIFO).....	40
Figura 26 – Ordenação dos despachos (FISFS).	41
Figura 27 – <i>Failures</i>	42
Figura 28 – Aplicação das avarias.....	43
Figura 29 – Estatísticas.	47
Figura 30 – Exemplo de um relatório do Arena.....	47
Figura 31 – Parâmetros das simulações.	48
Figura 32 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – Estágio único com máquinas paralelas.....	51

Figura 33 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – <i>Linha pura com máquinas paralelas</i>	52
Figura 34 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i>	54
Figura 35 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Estágio único com máquinas paralelas.....	58
Figura 36 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Linha Pura com máquinas paralelas.....	59
Figura 37 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Linha genérica com máquinas paralelas.....	60
Figura 38 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, <i>Estágio único com máquinas paralelas</i>	61
Figura 39 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, <i>Linha pura com máquinas paralelas</i>	62
Figura 40 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i>	63

Índice de Tabelas

Tabela 1	– Artigos no âmbito DRC em ambiente estocástico.....	6
Tabela 2	– Artigos no âmbito DRC em ambientes determinísticos.	8
Tabela 3	– Tipos de configurações utilizadas.	18
Tabela 4	– Configuração Estágio único com máquinas paralelas.	19
Tabela 5	– Configuração Linha pura com máquinas paralelas.	20
Tabela 6	– Configuração Linha genérica com máquinas paralelas.	20
Tabela 7	– Plano experimental base.....	45
Tabela 8	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FISFS.	74
Tabela 9	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	74
Tabela 10	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FISFS.	74
Tabela 11	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	75
Tabela 12	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FISFS.....	75
Tabela 13	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FIFO.	75
Tabela 14	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FISFS.	76
Tabela 15	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	76
Tabela 16	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FISFS.	76
Tabela 17	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	77
Tabela 18	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FISFS.....	77
Tabela 19	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FIFO.	77
Tabela 20	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FISFS.	78
Tabela 21	– Indicadores de desempenho: <i>Estágio único com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	78
Tabela 22	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FISFS.	78
Tabela 23	– Indicadores de desempenho: <i>Linha pura com máquinas paralelas</i> , FIFO.....	79
Tabela 24	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FISFS.....	79
Tabela 25	– Indicadores de desempenho: <i>Linha genérica com máquinas paralelas</i> , FIFO.	79

Acrónimos

CMS	–	<i>Critical Machine Selection</i>
CONWIP	–	<i>Constant Work In Process</i>
CR	–	<i>Critical Rate</i>
DD	–	<i>Due Date</i>
DRC	–	<i>Dual Resource Constrained</i>
EDD	–	<i>Earliest Due Date</i>
FIFO/FCFS	–	<i>First-In-First-Out/First Come First Served</i>
FISFS	–	<i>First-In-System-First-Served</i>
IMM	–	<i>Immediate Release</i>
LNQ	–	<i>Longest Number in Queue</i>
LUMSCOR	–	<i>Lancaster University Management School Corrected Order Release</i>
LWT	–	<i>Longest Waiting Time</i>
MODD	–	<i>Modified Operation Due Date</i>
MST	–	<i>Minimum Slack Time</i>
MTBF	–	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	–	<i>Mean Time to Repair</i>
ODD	–	<i>Operation Due Date</i>
ORR	–	<i>Order Review/Release</i>
POLCA	–	<i>Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i>

- SPT – *Shortest Processing Time*
- SRTF – *Shortest Remaining Processing Time*
- STPT – *Shortest Total Processing Time*
- STT – *Shop Throughput Time*
- VBA – *Visual Basic for Applications*
- WLC – *Workload Control*

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Este projeto surge como uma proposta de estudo do desempenho de sistemas de produção limitados por duas grandes categorias de recursos: pessoas e máquinas. Pretende-se estudar o impacto destas no desempenho de sistemas de produção orientados à produção por encomenda (*make-to-order*).

A capacidade dos sistemas de produção é geralmente restringida pela disponibilidade das máquinas e dos trabalhadores, entre outras categorias de recursos como, por exemplo, ferramentas e sistemas de transporte. Este tipo de sistemas envolvendo dois tipos de recursos, são conhecidos na terminologia inglesa por *Dual Resource Constrained* (DRC). É no âmbito dos sistemas DRC envolvendo máquinas e homens, que este trabalho é levado a cabo.

De acordo com Xu *et al.* (2011) é possível verificar uma tendência nos sistemas produtivos no que toca a um aumento da flexibilidade dos mesmos e á produção de produtos customizados com ciclos de vida cada vez menores. Ainda que no contexto da Indústria 4.0, os processos produtivos possam tornar-se menos dependentes de recursos humanos no espaço fabril, estes, contudo, serão sempre importantes. Nos sistemas DRC considera-se, portanto, que os recursos humanos são limitadores da capacidade do sistema. Isto acontece nomeadamente, quando o número de recursos deste tipo é inferior ao número de máquinas (ou

estações de trabalho) que é necessário operar, existindo, portanto, a necessidade de movimentação dos mesmos entre as diversas estações de trabalho de acordo com as necessidades.

Os sistemas DRC são, em regra geral, mais complicados do que os seus equivalentes de recursos únicos, apresentando uma série de desafios técnicos adicionais que devem ser considerados no âmbito do controlo da atividade de produção, nomeadamente relacionadas com a alocação dos trabalhadores, ou seja:

- Quem, quando e para onde deve ser transferido? Que regras devem ser definidas para esse controlo?
- Qual o grau ideal de polivalência dos trabalhadores? Devem todos ter o mesmo grau?
- Que custos adicionais terá a empresa? E que proveitos?

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto prende-se no estudo do desempenho de sistemas do tipo DRC em função das regras usadas na sua operação, nomeadamente:

- Das regras utilizadas para alocar os trabalhadores às máquinas, conhecidas por regras do tipo *where* e *when*;
- Da configuração do sistema de produção, nomeadamente do tipo máquina única, *flow shop* (linha) e *flexible flow shop*;
- Da disponibilidade das máquinas dependente de possíveis avarias.
- Das regras estabelecidas para sequenciar os trabalhos nas máquinas que se encontram no espaço fabril, conhecidas por regras de despacho;

Para realizar a avaliação do desempenho do sistema são usados diferentes indicadores, tais como o tempo total que os trabalhos passam no sistema de produção; a percentagem de trabalhos que conclui o seu processamento após a data de entrega (*Due Date – DD*), ou seja, em atraso; o atraso médio dos trabalhos e a percentagem de utilização dos trabalhadores;

1.3. CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O relatório encontra-se organizado em 5 capítulos. No próximo capítulo, o segundo, é feita uma revisão da literatura, referindo alguns dos estudos relacionados com o projeto em questão, no âmbito da temática do DRC. O terceiro capítulo descreve o estudo de simulação realizado, envolvendo a construção e desenvolvimento dos modelos de simulação com base no *software* Arena, o plano experimental e as medidas de desempenho. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, o quinto e último capítulo, apresenta as conclusões retiradas e aborda algumas propostas de trabalho futuro.

2. DRC: REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma revisão da literatura no âmbito dos sistemas DRC. São ainda abordados e analisados conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do projeto no âmbito do DRC. O capítulo tem por base a consulta de diversos artigos científicos relacionados com o tema em questão.

2.1. TRABALHO DESENVOLVIDO

Os artigos científicos relacionados que o tema do DRC e que são considerados mais relevantes no âmbito deste projeto, encontram-se detalhados na Tabela 1. O objetivo é proporcionar ao leitor, uma espécie de repositório com os trabalhos importantes realizados sobre esta temática, divididos pelos vários tipos de métodos utilizados, resumindo o trabalho desenvolvido. Para a escolha dos artigos definiu-se alguns critérios, nomeadamente:

- Similaridade com o tema deste projeto;
- Trabalhos recentes;

Na Tabela 1 faz-se uma breve descrição dos trabalhos desenvolvidos e principais contribuições no âmbito do DRC, no âmbito do ambiente produtivo considerado no trabalho, ou seja, em ambientes estocásticos.

Tabela 1 – Artigos no âmbito DRC em ambiente estocástico.

Referências	Descrição
Thürer, M., Stevenson, M., Renna, P. (2019).	Este trabalho centra-se em estudar os efeitos de um mecanismo de controlo da carga (<i>Workload Control</i>) num ambiente de produção DRC de elevada variedade de produtos e produção por encomenda. O estudo é levado a cabo usando a simulação. Uma das conclusões retiradas foi que os mecanismos aplicados nesta investigação, melhoram a <i>performance</i> deste tipo de ambiente.
Thürer, M., Zhang, H., Stevenson, M., Costa, F., Ma, L. (2019).	Estuda os efeitos de diferentes regras associadas à alocação de trabalhadores, do tipo <i>When</i> e <i>Where</i> , num ambiente produtivo de elevada diversidade de produtos, do tipo DRC. Uma das conclusões retiradas, foi que os ganhos resultantes pela permanência nas estações de trabalho mais eficientes superam as perdas de outras estações, menos eficientes, resultantes da espera de novos trabalhos.
Leilei, M., Chaoyong, Z., Biao, Z., Yaping, R. (2019).	Este estudo aborda os gastos de energia por parte das máquinas de um <i>job shop</i> flexível do tipo DRC, tendo por objetivo minimizar os custos associados. Para o efeito, são desenvolvidos diversos modelos matemáticos. Em termos de conclusões, foi referido, que por ser um estudo pioneiro, serão necessários mais estudos para desenvolver medidas mais eficientes.
Andrade-Pineda, J.L., Canca, D., Gonzalez-R, P.L. (2019).	Desenvolvido numa loja de reparação de automóveis oficial da Toyota, em Sevilha, este estudo tem o objetivo de melhorar a eficiência de funcionamento deste <i>job shop</i> do tipo DRC em termos de gestão dos custos e dos trabalhadores. Utiliza para tal, um algoritmo desenvolvido em linguagem de programação C++. Os resultados desta implementação, concluíram que houve um melhoramento significativo em termos de cumprimento de prazos de entregas aos clientes.
Salum, L., & Araz, Ö. U. (2009).	Este estudo implementa um sistema de controlo da produção híbrido do tipo <i>Push-Pull</i> utilizando a simulação. O objetivo consiste em mostrar as vantagens deste tipo de sistemas híbridos, utilizados no Toyota Sewn Products Management System (TSS), aplicados num ambiente DRC, utilizando as regras <i>where/when</i> para afetação dos trabalhadores e com métodos de controlo de

	<p>entrada. Uma das conclusões desta investigação, foi que permitiu uma melhor gestão dos gargalos de produção.</p>
<p>Wang, Y., Cen, H. J., Yang, O. (2018).</p>	<p>Apresenta um modelo matemático para a redução de custos de um <i>job shop</i> de pequenas dimensões, satisfazendo as necessidades de produção e ciclos de produção exigidas, num sistema DRC. Estabeleceram um modelo matemático e simularam os resultados num Multi Agent System (MAS). Os resultados da simulação comprovaram o sucesso do modelo estabelecido.</p>
<p>Zheng, X., & Wang, L. (2016).</p>	<p>Este estudo foca-se em resolver os problemas de afetação de tarefas num <i>job shop</i> do tipo DRC, com o objetivo de minimizar o tempo total de produção. Utiliza um algoritmo de otimização customizado de modo a ajustar continuamente a sequência de todas as operações e dos recursos (humanos, máquinas). Compararam os resultados deste algoritmo com os já existentes, até à data, e concluíram que o algoritmo proposto é mais eficiente.</p>
<p>Yue, H., Slomp, J., Molleman, E., Van Der Zee, D. J. (2008).</p>	<p>Estuda diferentes políticas de <i>cross-training</i>, numa célula de produção do tipo DRC. Verificando os seus efeitos ao nível de simulação, tendo em conta <i>Learning and Forgetting Effects</i>, concluíram que o excesso de flexibilidade pode diminuir a performance de um sistema produtivo.</p>
<p>Xu, J. (2013).</p>	<p>Tem como objetivo fornecer uma base de apoio a empresas Neozelandesas, para otimizar os seus processos produtivos, utilizando conceitos do DRC, através de uma <i>framework</i> denominada por CERES. Esta ferramenta flexível, permitiu otimizar horários de produção, fazer uma melhor gestão dos recursos, entre outras benéficos.</p>
<p>Bokhorst, J. A. C., Slomp, J., & Gaalman, G. J. C. (2004).</p>	<p>Este estudo procura utilizar as denominadas <i>Who rules</i> que, segundo os autores, normalmente não são consideradas nos diversos estudos realizados ou, são consideradas como um fator fixo. Através de simulação, pretendem demonstrar detalhadamente quais os momentos-chave aos quais devem ser aplicadas este tipo de regras. Alguns resultados, foram que a aplicação desta regra depende muito da flexibilidade dos trabalhadores e é particularmente útil em casos que possam ser aplicadas estas mesmas regras no futuro (i.e., simulações), ou seja, antecipadamente.</p>
<p>Costa, F., Portioli-Staudacher, A., Nisi, D. & Rossini, M. (2019).</p>	<p>O objetivo principal desta investigação é criar um mecanismo de controlo de <i>outputs</i> em conjunto com um mecanismo de controlo de <i>inputs</i> de forma a criar uma estratégia de ajustamento de capacidades, integrada numa <i>flow shop</i>. Através de simulação, apresentam um modelo que concilia estes mecanismos de controlo e mostra que existem benefícios na implementação destes dois métodos, como apenas realizar transferência de trabalhadores somente em momentos necessários. Os autores abrem a porta a</p>

	novos estudos baseados neste como, por exemplo, testar diferentes regras de alocação de trabalhadores (<i>Where, When e Who rules</i>).
--	---

Na Tabela 1 faz-se uma descrição dos trabalhos no âmbito do DRC, noutros ambientes produtivos, nomeadamente utilizando algoritmos genéticos em ambientes determinísticos.

Tabela 2 – Artigos no âmbito DRC em ambientes determinísticos.

Referências	Descrição
Tao, Z., Liu, X. (2019).	O objetivo deste estudo consiste em reduzir o tempo de total de produção num <i>job shop</i> do tipo DRC. Para tal utiliza um algoritmo genético para resolver um problema de <i>escalamento dinâmico</i> , num ambiente simulado. As conclusões foram, que este método é eficaz e que reduz o tempo total de produção de um <i>job shop</i> do tipo DRC.
Yang, G., Do Chung, B., Jin Lee, S. (2019).	Este estudo foi realizado com o objetivo de minimizar atrasos e tempos de produção, através da definição prévia de prioridades ao nível dos despachos, num <i>job shop</i> flexível do tipo DRC. Para tal, criaram de raiz um algoritmo genético híbrido. Concluiu-se que este método é mais eficiente para problemas complexos, em relação a outros algoritmos genéticos, em termos de duração da execução do algoritmo e eficiência. No entanto, para problemas mais simples, acontece o oposto.
Zhong, Q., Yang, H., Tang, T. (2018).	Este estudo tem como objetivo otimizar o funcionamento de um <i>job shop</i> do tipo DRC. Para tal utiliza um algoritmo genético para gerar as melhores soluções e simulam-nas. Os resultados obtidos confirmaram uma redução de 7,4% no tempo de duração da produção e uma redução de 4,7% nos custos totais.
Paksi, A. B. N., & Ma'ruf, A. (2016).	Esta investigação tem como objetivo fornecer um método capaz de resolver os denominados <i>scheduling problems</i> , num <i>job shop</i> do tipo DRC. Para o efeito utiliza um algoritmo genético desenvolvido em <i>Visual Basic</i> pelos próprios investigadores. O resultado foi uma redução da percentagem de trabalhos em atraso em cerca de 25%.

2.2. DRC EM AMBIENTES DE CONTROLO DE CARGA

O sistema de controlo de carga conhecido por *Workload Control (WLC)*, (Land & Gaalman, 1995; Thüerer *et al.*, 2019a; Thüerer *et al.*, 2019b) foi especialmente desenvolvido para a produção por encomenda. Tem por objetivo, controlar as entradas (ao nível da entrada de

encomendas, lançamento de trabalhos em produção e despacho nas filas de espera) e as saídas (através de ajuste de capacidade) de um sistema produtivo. Este considera o sistema produtivo como um conjunto de filas de espera (*queues*), onde os trabalhos aguardam pela disponibilidade dos recursos (e.g. máquinas) para que possam ser processados. Se as filas de espera se mantiverem reduzidas e estáveis, então será possível oferecer prazos de produção curtos e fiáveis aos clientes. A Figura 1 ilustra os diferentes níveis de controlo usados ao nível da entrada e saída de trabalhos no sistema.

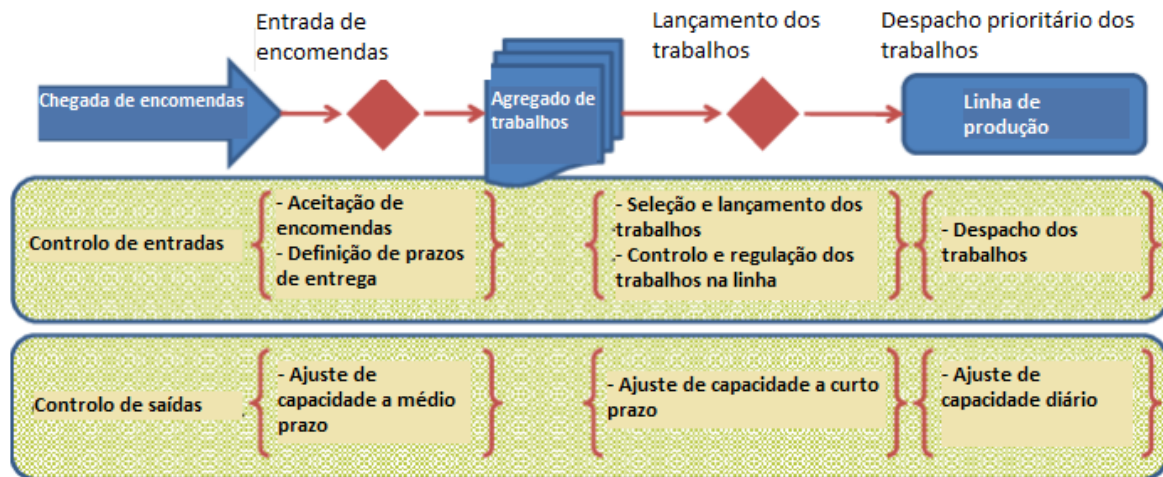


Figura 1 – *Workload Control* adaptado de Land & Gaalman (1995).

Através da observação da Figura 1 é possível distinguir três níveis hierárquicos de controlo de carga no sistema de produção, nomeadamente:

- *Order Entry* (entrada de encomendas): onde se toma a decisão de aceitação ou não da encomenda colocada pelo cliente;
- *Job Release* (lançamento de trabalhos): onde se toma a decisão relativamente aos trabalhos e momento temporal que devem ser lançados em produção;
- *Priority Dispatching* (despacho dos trabalhos): onde se toma a decisão relativamente a qual dos trabalhos em fila de espera de uma máquina deve ser selecionado para processamento quando a máquina ficar livre.

A maior parte dos estudos levados a cabo no âmbito do controlo da atividade de produção, nomeadamente usando o *Workload Control* consideram que a capacidade do sistema é restringida unicamente pela disponibilidade de um único tipo de recurso (máquinas). Contudo, na prática, a maioria dos sistemas produtivos são limitados pela disponibilidade de dois tipos

de recursos (máquinas e trabalhadores). Exceções a isto são, por exemplo, os trabalhos de, (Thürer *et al.*, 2019a), (Thürer *et al.*, 2019b), (Salum & Araz, 2009) e (Portioli-Staudacher *et al.*, 2019).

A Figura 2 ilustra algumas das potenciais decisões a considerar em sistemas do tipo DRC. Estes estão basicamente relacionados com o lançamento dos trabalhos em produção, o despacho dos mesmos, a flexibilidade da força de trabalho e respetiva alocação do trabalhador às máquinas e ainda os custos de movimentação entre máquinas ou recursos.

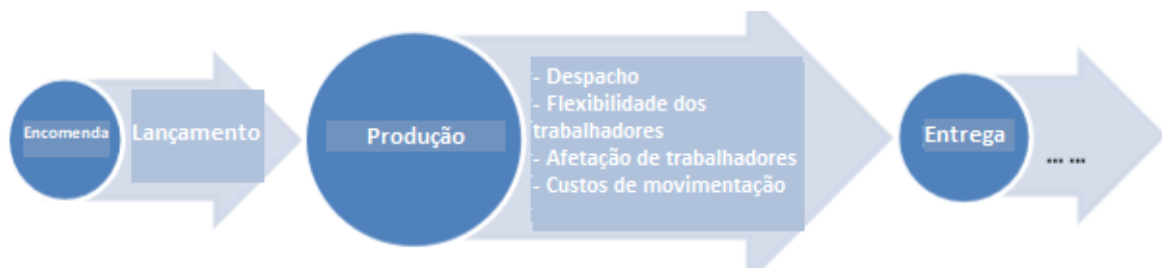


Figura 2 – Problemas abordados pelos sistemas DRC, adaptado de Xu (2013).

Nas seções seguintes, serão discutidos estes problemas típicos nos sistemas DRC, através da análise de algumas regras aplicadas em inúmeros estudos nesta área.

2.3. LANÇAMENTO

Ao longo dos anos, vários investigadores e académicos desta área, estudaram os efeitos de vários mecanismos responsáveis pelo lançamento dos trabalhos em produção. Contudo a potencial interação entre o lançamento e a afetação de trabalhadores em ambientes DRC tem sido pouco estudada. Thürer, *et al.* (2019a), investiga um sistema do tipo DRC num ambiente de alta variedade produtiva do tipo *job shop*. A regra utilizada para controlar o lançamento de trabalhos foi baseada no método *Lancaster University Management School Corrected Order Release* (LUMSCOR). Os autores demonstraram através da simulação que combinando o lançamento contínuo (baseado na carga do sistema) e periódico melhora significativamente o desempenho deste tipo de sistemas produtivos. Os resultados mostraram, por exemplo, que os tempos no sistema (*throughput times*) e os atrasos podem ser melhorados em simultâneo. No entanto, este estudo possui algumas limitações, assumindo que os trabalhadores são totalmente intercambiáveis (em termos de processamento) entre os postos de trabalho.

Um estudo conduzido por Fredendall & Melnyk (1995), resultou na implementação de um sistema de *lançamento* num contexto DRC, que tem como objetivo reduzir a carga de trabalho, antes de serem efetivamente enviadas as ordens de trabalho para a *job shop*. Para controlar a carga de trabalho a ser enviada para o espaço fabril, utilizam um sistema de *Order Review/Release* (ORR) (Melnyk & Ragatz 1989) com duas regras:

- *Critical Machine Selection* (CMS): Os trabalhos são lançados em produção apenas quando a *fila de espera* do primeiro posto de trabalho está vazia e existe um operador disponível;
- *Immediate Release* (IMM): Os trabalhos que chegam ao sistema provenientes do sistema de planeamento ou de encomendas do cliente são imediatamente lançados em produção.

Num estudo mais recente realizado por Salum & Araz (2009), os autores introduziram um sistema de controlo DRC híbrido do tipo *push-pull* (*Hybrid Push-Pull – HPP*), que se baseia nos princípios dos sistemas *push* e sistemas *pull*, tendo em conta as potencialidades de cada um (Dias 2005). O lançamento é realizado através do mecanismo *Constant Work in Process* (CONWIP) que regula a quantidade de trabalho a entrar no espaço fabril. A Figura 3 representa, de forma geral, o mecanismo aqui aplicado.

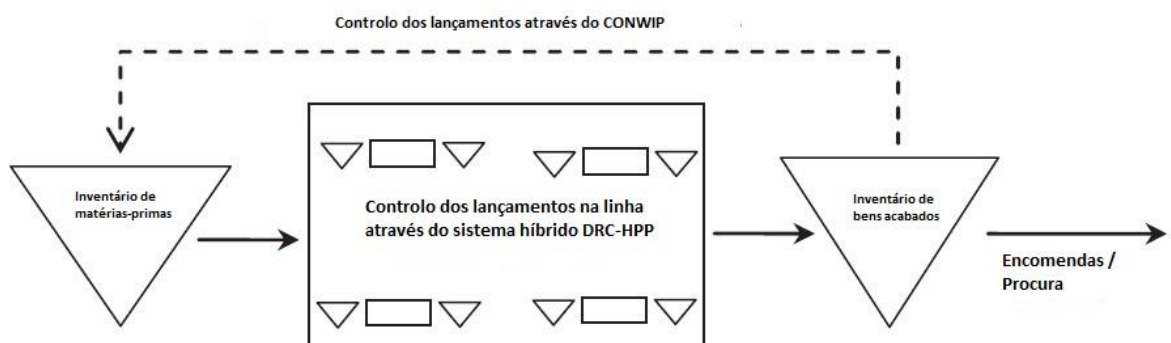


Figura 3 – Controlo da informação/matérias-primas, adaptado de Salum & Araz (2009).

No estudo, os trabalhadores estão encarregues de realizar o transporte de peças (trabalhos), ao contrário do que acontece noutros sistemas de produção onde existe um grupo de trabalhadores para o transporte de peças e outro para o processamento das mesmas. Sempre que existam tempos mortos (*idle time*) no processamento, os trabalhadores encarregam-se de fazer o transporte de peças. É referido também que são os próprios a definir quando é que

devem transportar peças, ou quando é que devem permanecer no seu posto, conferindo um certo grau de autonomia. Os resultados desta investigação indicam que o sistema proposto aumenta a coordenação do processamento e transporte de peças e permite uma gestão mais facilitada dos estrangulamentos de produção. Também é referido que este sistema funciona melhor se a distância entre as máquinas for reduzida.

2.4. DESPACHO

Uma decisão como possíveis interações com a afetação de trabalhadores em sistemas DRC é o despacho (Xu *et al.*, 2011). O despacho define a ordem ou sequência pela qual os trabalhos são processados nas máquinas do espaço fabril. Neste âmbito, diversas regras têm sido estudadas com o objetivo de melhorar o possível impacto na *performance* do sistema. Fredendall & Melnyk (1995), por exemplo, estudam duas regras para o despacho de trabalhos:

- *First-In-First-Out/First Come First Served* (FIFO/FCFS), que ordena os trabalhos em fila de espera pelo tempo de chegada destes.
- *Modified Operation Due Date (MODD)*, que ordena os trabalhos levando em consideração o seu tempo de processamento e sua data devida de conclusão na estação de trabalho (Baker & Bertrand 1982), de acordo com a equação (1). Com esta regra os trabalhos são ordenados pelo menor tempo de processamento, quando estão atrasados, ou pela data devida de conclusão (*Operation Due Date – ODD*) na estação de trabalho quando estão dentro do prazo.

$$MODD_j = \text{Max.} [t + PT_j; ODD_j] \quad (1)$$

Onde t se refere ao momento da decisão, PT_j ao tempo de processamento do trabalho j e ODD_j a data devida para a conclusão do trabalho j . Aplicando estas duas regras, os autores concluíram que a regra FIFO, mesmo sendo simples, é tão ou mais eficaz no despacho dos trabalhos, como outras regras mais complexas, defendendo a tese da simplicidade das regras de despacho (Fredendall & Melnyk 1995).

Araz & Salum (2010) propuseram um mecanismo dinâmico de seleção de regras de despacho. Segundo os autores, não existe uma regra de despacho que seja considerada a melhor. Para tal, desenvolveram um mecanismo que permite a seleção de regras de despacho a implementar de forma dinâmica e de acordo com as mudanças que possam ocorrer no sistema produtivo. Seguindo esta lógica, definiram 7 regras diferentes para o despacho:

- FIFO
- *Shortest Processing Time* (SPT) – Seleciona-se o trabalho que possui um tempo de processamento menor, como critério;
- *Earliest Due Date* (EDD) – Elege-se aquele que tem uma data devida de entrega mais cedo;
- *Shortest Remaining Processing Time* (SRPT) – Escolhe o trabalho que tem um tempo restante de processamento menor;
- *Critical Ratio* (CR) – Rácio da diferença entre o tempo restante para a data devida de entrega e a estimativa do tempo de processamento restante;
- *Minimum Slack Time* (MST) – Seleciona os trabalhos com o menor *slack time*, ou seja, o tempo que o processamento de um trabalho pode ser adiado, sem causar atrasos subsequentes.
- CR/SPT combinadas.

Neste estudo, os autores frisaram que os resultados da aplicação deste tipo de regras, dependem muito dos critérios de desempenho utilizados.

2.5. FLEXIBILIDADE DO TRABALHADOR

A flexibilidade neste contexto específico, significa a capacidade do trabalhador para realizar diferentes tarefas, ou seja, refere-se ao seu grau de polivalência. Este aspeto é importante em sistemas DRC, devido ao facto de o número de trabalhadores ser geralmente inferior ao número de máquinas, como anteriormente referido.

Muitos dos estudos feitos nesta área, (Xie *et al.* 2003) por exemplo, consideram trabalhadores com igual grau de polivalência ou flexibilidade. No entanto, esses estudos não refletem o que muitas vezes ocorre na vida real. Diferentes trabalhadores têm diferentes *skills*. Tendo isto em conta, alguns autores consideraram este efeito no desempenho geral dos sistemas produtivos (Bobrowski & Park 1993). Por exemplo, Norman, *et al.* (2002), considerou 4 tipos diferentes de *skills* que se refletem a produtividade e a qualidade do trabalho efetuado numa célula de produção. Quanto maior o nível de *skill* (flexibilidade) do trabalhador, maiores serão os custos e a duração associados ao seu treino e maior a qualidade e produtividade

do mesmo. Por outro lado, a menor produtividade e qualidade, de trabalho (nível de *skill* inferior), refletem custos associados à baixa qualidade e eficiência. Tendo em consideração este modelo e os pros e contras associados, cabe a cada empresa tomar as melhores decisões, ou seja, encontrar o equilíbrio entre estes custos e o nível de formação dos seus trabalhadores, mediante a sua capacidade financeira.

2.6. AFETAÇÃO DE TRABALHADORES

De acordo com a literatura (Xu *et al.* 2011), a afetação dos trabalhadores a estações de trabalho pode ser feita levando em consideração dois tipos de regras: quando (*When Rules*) e onde (*Where Rules*), se os trabalhadores forem considerados homogêneos. No entanto, se os trabalhadores possuírem diferentes níveis de competências, um terceiro tipo de regras deve ser considerado: quem (*Who Rules*).

As *When Rules* definem quando um trabalhador pode ser transferido para outra estação de trabalho e são conhecidas como regras que controlam os mesmos. Existem duas formas de controlo dentro deste tipo de regras segundo Salum & Araz (2009) e Kher & Fry (2001):

- Controlo Centralizado – o trabalhador pode ser transferido para outra estação imediatamente após terminar um trabalho, mesmo que haja mais trabalhos em fila de espera (*queue*) na estação onde se encontra. Procura tirar partido da flexibilidade dos operários e é útil para lidar com estações críticas;
- Controlo Descentralizado – Não permite que o trabalhador seja transferido para outra estação até que todos os trabalhos que se encontram em fila de espera da estação em que se encontra sejam terminados. Tem como motivação os potenciais custos associados tempos de movimentação entre estações.

Apesar de cada um destes tipos de controlo possuírem as suas vantagens e desvantagens, alguns estudos (Salum & Araz (2009); Kher & Fry (2001); Fredendall & Melnyk (1995), por exemplo) apontam para a utilização de ambos, mediante as situações, de forma flexível e adaptativa.

As *Where Rules*, segundo Xu (2013), definem para que local o trabalhador se deverá deslocar. Algumas das *Where Rules* mais utilizadas nos trabalhos de investigação, são:

- *Longest Number in Queue* (LNQ) – o trabalhador desloca-se para a estação de trabalho com maior número de trabalhos em fila de espera (*Queue Length*);
- *Longest Waiting Time* (LWT) – o trabalhador desloca-se para a estação com o trabalho em espera há mais tempo (*Waiting Time*);

Estes dois tipos de regras (*when* e *where*) foram utilizados em vários estudos realizados (Salum & Araz 2009, 2010); (Kher & Fry 2001), com diferentes características no que toca aos tipos de sistemas produtivos. Uma das conclusões retiradas, foi que as regras responsáveis por influenciar *quando* movimentar (*when rules*) têm mais impacto no desempenho dos sistemas produtivos do que as regras que definem *para onde* movimentar (*where rules*).

2.7. OUTROS FATORES

Os custos de movimentação estão ligados às movimentações dos trabalhadores entre estações de trabalho. Os custos decorrem essencialmente dos tempos envolvidos nessas deslocações, durante os quais o trabalhador não realiza uma tarefa que acrescente valor – ou seja acaba por haver uma perda de capacidade do sistema. Podem ainda estar envolvidos custos de perda de produtividade associados a efeitos de aprendizagem/esquecimento dos trabalhadores, quando são formados para realizar diversas tarefas. Este processo foi estudado por autores como Carlson & Rowe (1976) e ainda custos associados à própria formação e treino dos trabalhadores (Bailey 1989). Não obstante, também existem vantagens, como permitir a redução de fadiga dos trabalhadores (Fredendall & Melnyk (1995); Kher & Fry (2001)).

A primeira investigação que considera estes fatores nas suas simulações, em ambientes de simulação industriais do tipo DRC, foi conduzida por Kher *et. al* (1999). Estes utilizaram um dos modelos pioneiros sobre esta temática, *Learn-Forget-Learn* (LFL) de Carlson & Rowe (1976), com o objetivo de perceber as vantagens de se ter uma força operária flexível. Neste estudo não conseguiram concluir se, ao utilizar este tipo de modelo em simultâneo com uma força de trabalho flexível e treinada, trazia benefícios ao sistema produtivo. Não foram considerados fatores como, os tempos de processamento e os *roteiros* existentes nos *job shops* reais; também não consideraram os potenciais benefícios em termos do tempo médio que os trabalhos passam no sistema e nos atrasos destes.

Estes fatores foram posteriormente considerados num estudo de Kher (2000). Os resultados deste estudo, tendo em conta as diversas regras consideradas na construção do modelo de

simulação, foram situacionais como, por exemplo, no que toca ao desempenho do sistema produtivo:

- Quando os custos de treino são baixos, uma maior a flexibilidade dos trabalhadores, melhora a performance do sistema;
- Na presença de elevados custos associados à reaprendizagem dos trabalhadores, investir na flexibilidade dos mesmos piora o fluxo do sistema produtivo e aumenta os atrasos nas encomendas aos clientes.

Este estudo e muitos outros que foram surgindo, geraram um ponto de discussão em torno da flexibilidade dos trabalhadores, associada ao seu nível de formação e treino. Algumas investigações mostraram que existe um impacto negativo na *performance* de um sistema produtivo, se os trabalhadores forem movimentados entre estações de trabalho demasiadas vezes (Xu *et al.* 2011). Como é possível concluir, não existe um consenso claro no que toca a esta matéria, uma vez que existe a necessidade em determinar se os benefícios trazidos pela flexibilidade ultrapassam os inconvenientes decorrentes de perdas de produtividade causadas pelos *Learning and Forgetting Effects* e que são baseados em princípios de psicologia industrial (Xu 2013).

3. ESTUDO DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo vão ser abordados os temas referentes à elaboração dos diferentes modelos de simulação. Primeiro são apresentados os modelos utilizados e as políticas de controlo adotadas e finalmente apresenta-se o plano experimental e os indicadores de desempenho considerados.

3.1. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO USADO

Para criar os modelos de simulação necessários para o projeto, foi utilizado o *software* Arena, da *Rockwell Automation, Inc.* versão 14.00.00000, cujo *website* é <https://www.arenasimulation.com>.

3.2. MODELOS DE SIMULAÇÃO

Para iniciar o estudo de vários cenários produtivos através de simulação, foram consideradas 3 configurações *típicas dos sistemas de produção*, no que toca à sua organização física e que servem como base para o estudo levado a cabo. Foram consideradas as configurações (hipotéticas) indicadas na Tabela 3 para garantir a generalidade dos resultados, nomeadamente: Estágio único com máquinas paralelas; linha pura e linha genérica.

Tabela 3 – Tipos de configurações utilizadas.

<i>Configuração do Sistema de Produção</i>	<i>Descrição</i>
Estágio único com máquinas paralelas <i>– Parallel Production Stage</i>	Corresponde a um tipo de configuração em que existe um único estágio produtivo, com uma ou mais máquinas paralelas. É usual na indústria, podendo encontrar-se por exemplo em indústrias de injeção de plástico.
Linha pura	Trata-se de uma configuração linear, onde todos os trabalhos são processados pela mesma ordem nos diversos

<p>com máquinas paralelas em cada estágio – <i>Pure Flow Shop</i></p>	<p>estágios produtivos, ou seja, existe um fluxo unidirecional. Tradicionalmente orientada para a produção em grandes quantidades ou, em massa, (com flexibilidade reduzida) começa atualmente a ser usada também na produção em pequenas series no âmbito da indústria 4.0.</p>
<p>Linha genérica com máquinas paralelas em cada estágio – <i>Flexible Flow Shop</i></p>	<p>Idêntico à configuração em linha pura, ou seja, tem um fluxo unidirecional, mas não obriga a que todos os produtos passem em todos os estágios produtivos. Ou seja, difere no número de operações por trabalho, que é variável e na capacidade de proporcionar sequências diferentes para os trabalhos. Sendo mais flexível que a linha pura, este tipo de configuração pode ser enquadrado num contexto de produção orientado à encomenda (<i>make-to-order</i>)</p>

Nas Tabelas 4, 5 e 6, são apresentadas as características dos modelos de simulação para as três configurações estudadas.

Tabela 4 – Configuração Estágio único com máquinas paralelas.

Caraterísticas do Sistema de Produção	<p>N^a de estágios produtivos N^o de máquinas por estágio N^o de trabalhadores por estágio Utilização dos trabalhadores</p>	<p>1 3 1 90%</p>
Caraterísticas dos trabalhos	<p>N^o de operações por trabalho Tempos de processamento Data de entrega (DD) Intervalo entre chegadas</p>	<p>1 Distribuição de Erlang; (<i>média</i> = 0,5; <i>max.</i> = 2) Tempo chegada + <i>Lead Time</i> x n^o operações; (<i>Lead Time</i> =5) Exponencial; (<i>média</i> = 1,111)</p>

Tabela 5 – Configuração Linha pura com máquinas paralelas.

Caraterísticas do Sistema de Produção	<p>N^a de estágios produtivos</p> <p>Nº de trabalhadores por estágio</p> <p>Nº de trabalhadores por estágio</p> <p>Utilização dos trabalhadores</p>	<p>6</p> <p>3</p> <p>1</p> <p>90%</p>
Caraterísticas dos trabalhos	<p>Nº de operações por trabalho</p> <p>Tempos de processamento</p> <p>Data de entrega (DD)</p> <p>Intervalo entre chegadas</p>	<p>6</p> <p>Distribuição de Erlang; (<i>média</i> = 0,5; <i>max.</i> = 2)</p> <p>Tempo chegada + <i>Lead Time</i> x nº operações; (<i>Lead Time</i> =5)</p> <p>Exponencial; (<i>média</i> = 1,111)</p>

Tabela 6 – Configuração Linha genérica com máquinas paralelas.

Caraterísticas do Sistema de Produção	<p>N^a de estágios produtivos</p> <p>Nº de máquinas por estágio</p> <p>Nº de trabalhadores por estágio</p> <p>Utilização dos trabalhadores</p>	<p>6</p> <p>3</p> <p>1</p> <p>90%</p>
Caraterísticas dos trabalhos	<p>Nº de operações por trabalho</p> <p>Tempos de processamento</p> <p>Data de entrega (DD)</p> <p>Intervalo entre chegadas</p>	<p>Distribuição Discreta; [1,6]</p> <p>Distribuição de Erlang; (<i>média</i> = 0,5; <i>max.</i> = 2)</p> <p>Tempo chegada + <i>Lead Time</i> x nº operações; (<i>Lead Time</i> =5)</p> <p>Exponencial; (<i>média</i> = 0,648)</p>

Tendo em conta as três diferentes configurações do sistema de produção, foram construídos três modelos em Arena, um para cada configuração. A Figura 4, apresenta o modelo para a configuração Estágio único com máquinas paralelas com 3 máquinas paralelas.

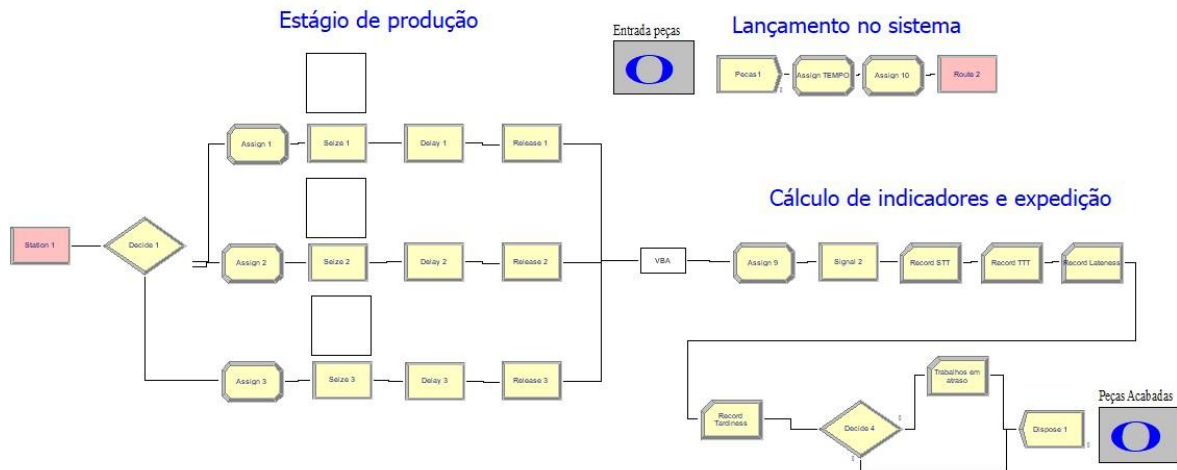


Figura 4 – Exemplo de um dos modelos de Estágio único com máquinas paralelas.

Os modelos desenvolvidos diferem apenas em certos aspectos que serão mencionados posteriormente, tendo em comum as três seguintes funções/decisões:

- **Chegada e Lançamento:** destinada a fazer a chegada de trabalhos ao sistema e o lançamento destes em produção (ver Figura 5). O lançamento é feito imediatamente após a chegada do trabalho. O bloco CREATE é utilizado para definir o intervalo entre chegadas de trabalhos; os blocos ASSIGN são utilizados para registrar o momento de chegada do trabalho (o que será útil para determinar o tempo em que cada trabalho fica no sistema); e para definir um prazo de entrega para cada trabalho (assume-se que a data de entrega é definida externamente pelo cliente); o bloco ROUTE é usado para laçar os trabalhos em produção encaminhando-os para os estágios produtivos.



Figura 5 – Chegada e lançamento.

- **Produção:** destinada a fazer o processamento dos trabalhos nas máquinas disponíveis. Ao chegarem ao estágio de produção os trabalhos são encaminhados para uma de 3 máquinas disponíveis, com igual probabilidade. Isto é feito através de um bloco

DECIDE. O processamento é modelado através de 3 tipos de blocos: bloco SEIZE, onde os trabalhos “capturam” o recurso quando estes ficam livres. Não estando livres, aguardam numa *queue* (fila de espera) onde são sequenciadas de acordo com a regra de despacho; bloco DELAY, onde se modela o tempo de processamento dos trabalhos e, por fim, um bloco RELEASE, que após o processamento, é responsável por libertar os recursos. A Figura 6, ilustra um estágio de produção com 3 máquinas paralelas.

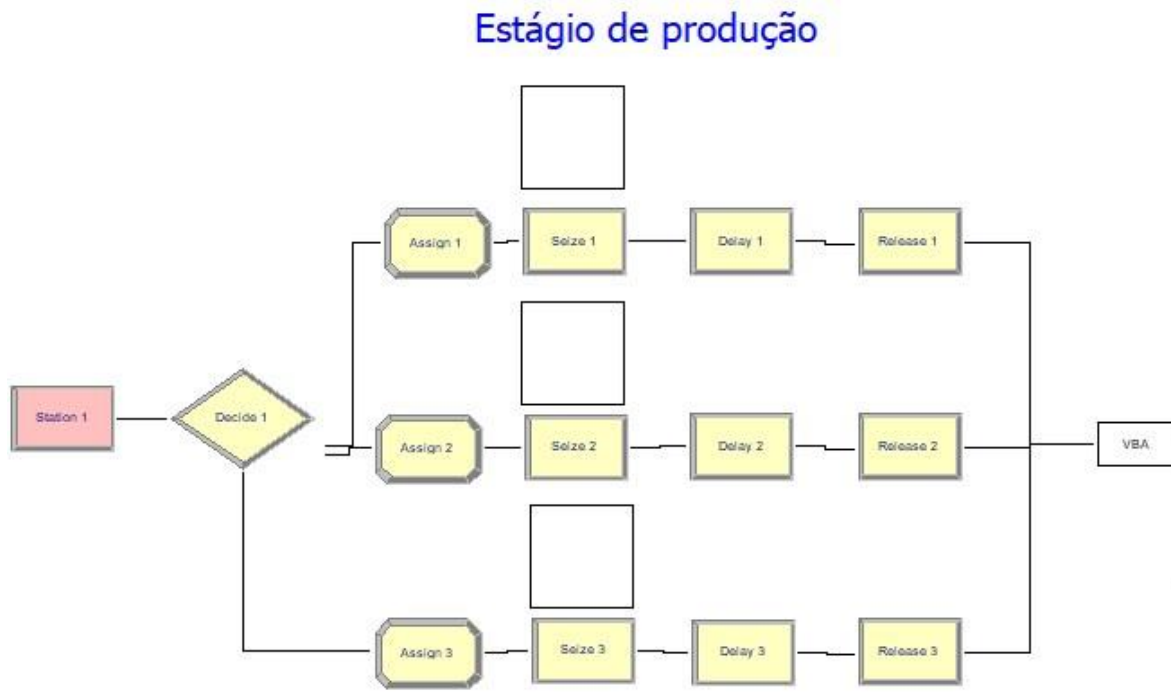


Figura 6 – Estágio de produção.

- **Cálculo de indicadores e expedição:** destinada a fazer a expedição do trabalho para o cliente e o registo de indicadores de desempenho. São usados vários blocos do tipo RECORD, que têm a função de registar diversas medidas de *desempenho* que serão apresentadas mais à frente. Após este registo, os trabalhos saem do sistema no bloco DISPOSE, o qual representa a expedição, como ilustrado na Figura 7.

Cálculo de indicadores e expedição

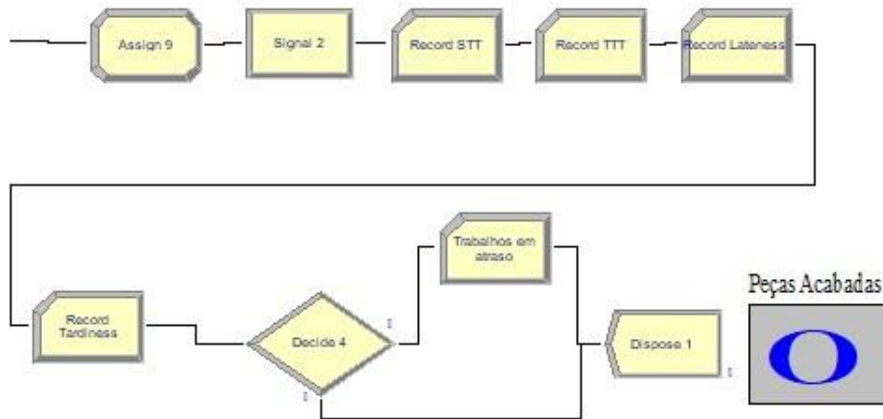


Figura 7 – Cálculo de indicadores e expedição.

Para a modelação da Linha pura com máquinas em paralelo (*Pure Flow Shop*) consideraram-se vários estágios produtivos em série, tal como ilustrado na Figura 8.

Linha de produção

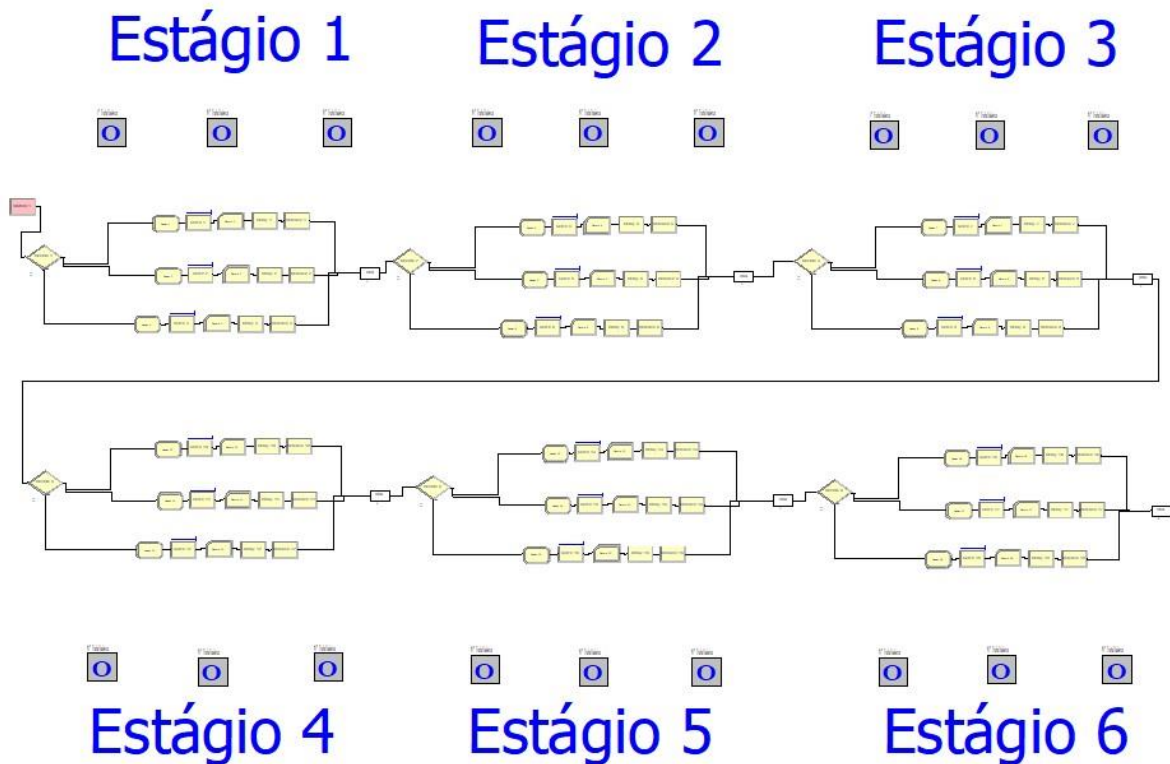


Figura 8 – Linha Pura.

Em relação à lógica deste modelo, é similar ao anterior, diferindo no número de estágios que são considerados. Neste caso existem 6 estágios com 3 máquinas cada um, perfazendo um total de 18 máquinas. Após o lançamento, os trabalhos dirigem-se para o primeiro estágio, passando de seguida pelos restantes estágios, até ao sexto, sempre pela mesma ordem.

Para a modelação da linha genérica com máquinas paralelas é considerado um modelo semelhante ao anterior, onde os trabalhos não necessitam de visitar todos os estágios. Ou seja, o trabalho visita um estágio com uma dada probabilidade. A Figura 9 apresenta o processo de seleção do próximo estágio a visitar.

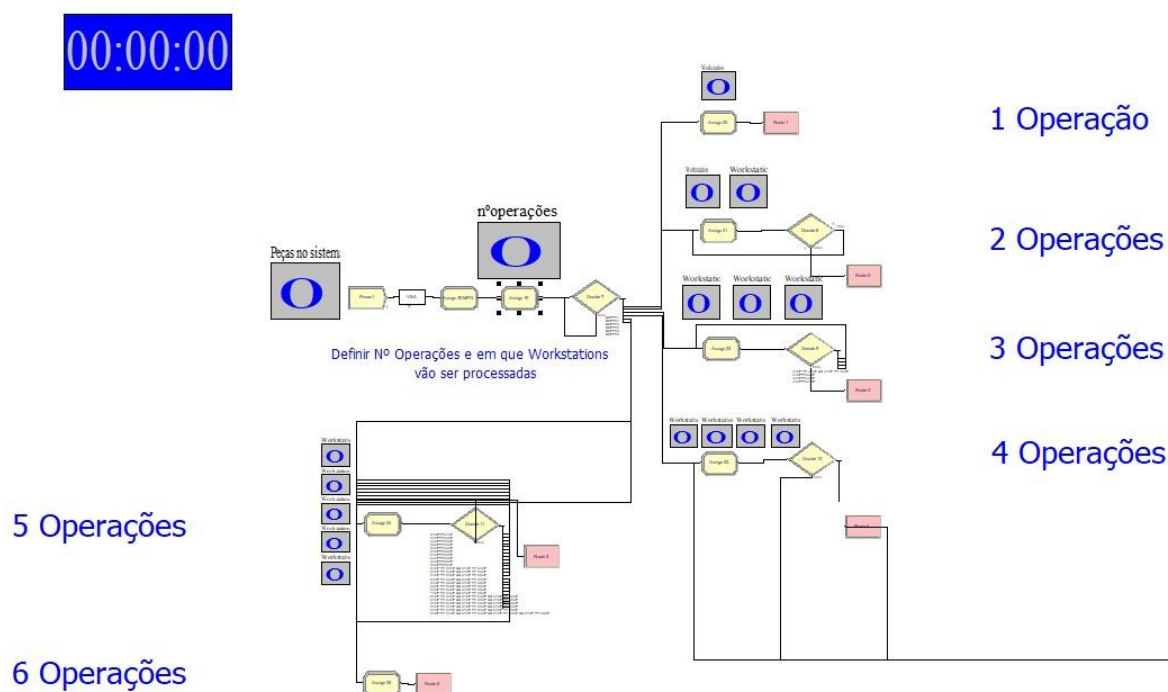


Figura 9 – Lançamento dos trabalhos, atribuição de operações e estações.

Para tal é introduzido um bloco ASSIGN (assinalado na Figura 9) que atribui o número de operações, de forma aleatória, a cada trabalho. A Figura 10, mostra como é realizada a atribuição aleatória e de igual probabilidade de um número variável de operações entre 1 e 6. Sendo assim, foi definido um *atributo*, com a designação *NOP* para representar o número de operações do trabalho.

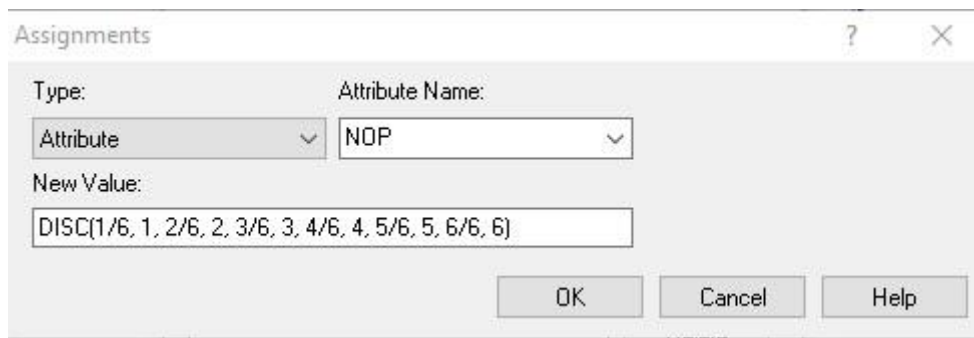


Figura 10 – Atribuição do número de operações por trabalho.

Para definir valores, ou expressões com várias finalidades em cada trabalho, podem ser usados *Attributes* ou *Variables*. A diferença entre os dois consiste no fato de que os *Attributes*, só podem ser modificados localmente, na entidade em que é definida, enquanto que as *Variables*, podem ser alteradas de forma global. Tendo em conta essas diferenças, é definido um *Attribute*, com nome *NOP*. No campo *New Value*, é possível definir valores ou expressões, conforme o objetivo. Neste caso, definiu-se uma expressão que representa uma função de probabilidade discreta (DISC), onde é possível gerar números de 1 a 6, com a mesma probabilidade (1/6). Após o bloco ASSIGN, o trabalho é encaminhado para locais diferentes no modelo usando o bloco DECIDE. Por exemplo, um trabalho com 3 operações, irá ser processado em três dos seis estágios produtivos presentes na linha. Para se saber para quais se vai deslocar, é necessário realizar mais uma atribuição aleatória como indicado na Figura 11.

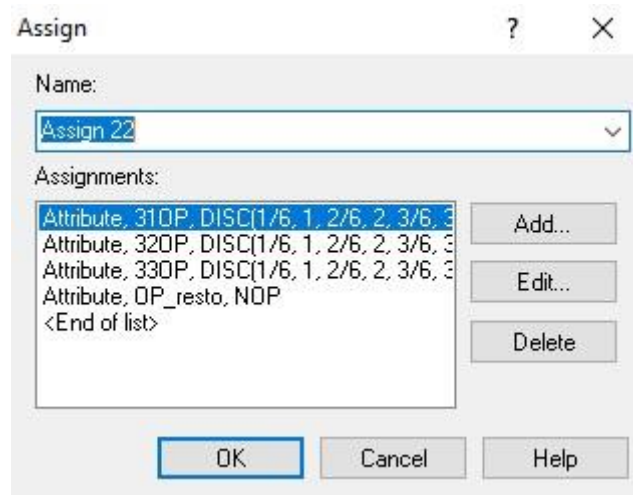


Figura 11 – Atribuição de estações de trabalho.

Neste bloco ASSIGN, são criados 3 atributos diferentes em que cada um gera um número aleatório de 1 a 6, com a finalidade de indicar um estágio ao qual se terá de dirigir. Estes atributos possuem uma nomenclatura específica, tendo em conta o número de operações. Seguindo este exemplo, foram atribuídas as designações 31OP, 32OP e 33OP. No entanto, poderá acontecer que sejam gerados 2 ou 3 números iguais fazendo com que, no fim, o trabalho se desloque para a mesma estação 2 ou 3 vezes. Para evitar isto, acrescentaram-se várias condições num bloco DECIDE, como indicado na Figura 12.

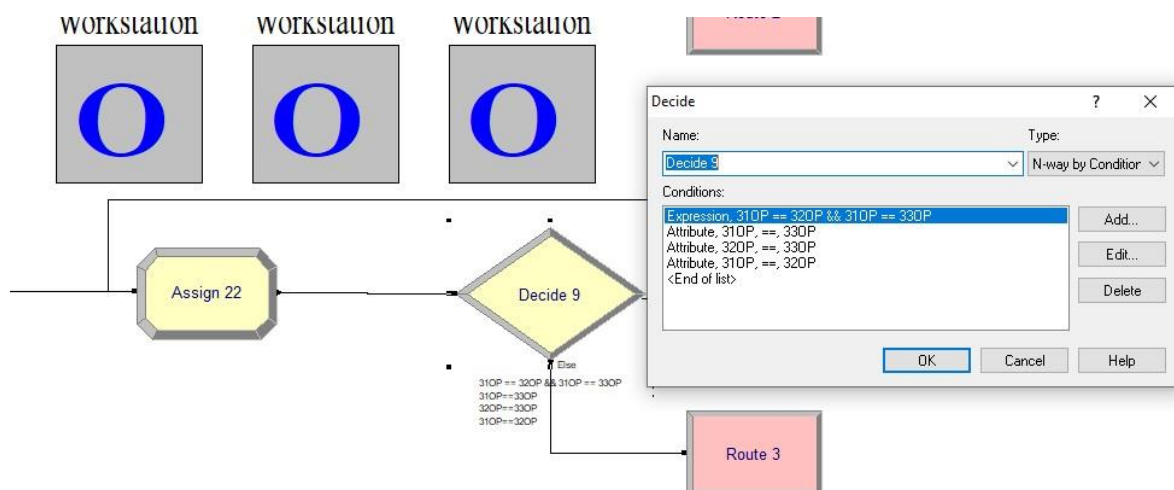


Figura 12 – Condições para 3 operações.

As condições aqui colocadas vão fazer com que a entidade (trabalho), caso tenham sido gerados 2 ou 3 números iguais, regresse ao bloco ASSIGN referido anteriormente para fazer uma nova atribuição. Este processo repete-se até todos os estágios serem diferentes. A lógica de atribuição mantém-se, independentemente do número de operações a atribuir ao trabalho. Posteriormente, os trabalhos são encaminhados para um bloco ROUTE, após a verificação das condições. Esse bloco reencaminha os trabalhos para o local descrito pela Figura 13.

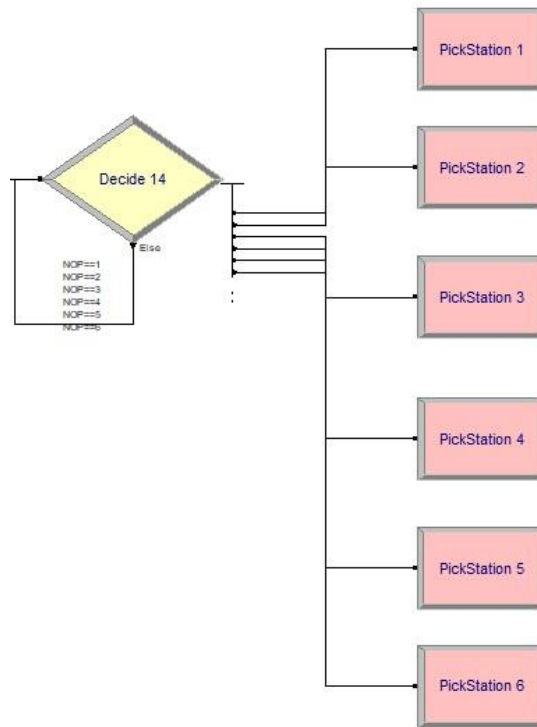


Figura 13 – Seleção do estágio e lançamento para a linha.

Esta seção está presente antes do lançamento dos trabalhos para os estágios de produção, ao contrário dos outros modelos, por dois motivos:

- Tem presente um bloco DECIDE que separa os trabalhos pelo número de operações que lhes foram atribuídas, como demonstra a Figura 14;
- Contém um conjunto de blocos PICKSTATION, que se encarregam de colocar os trabalhos na linha de forma ordenada. Seguindo o exemplo dado anteriormente, a Figura 15 demonstra o conteúdo de um desses blocos, para o caso de um trabalho ter 3 operações por realizar.

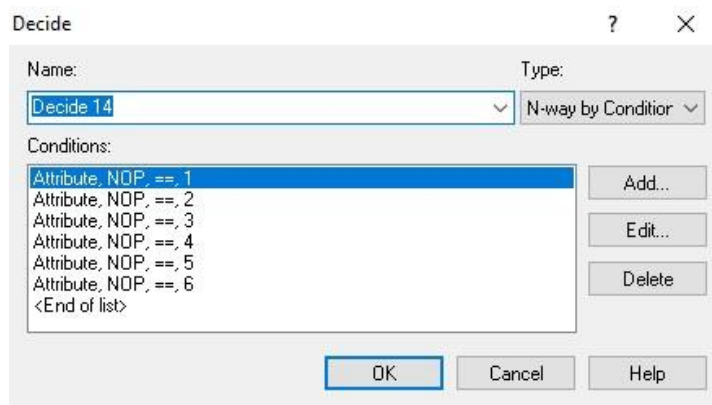


Figura 14 – Separação dos trabalhos pelo número de operações.

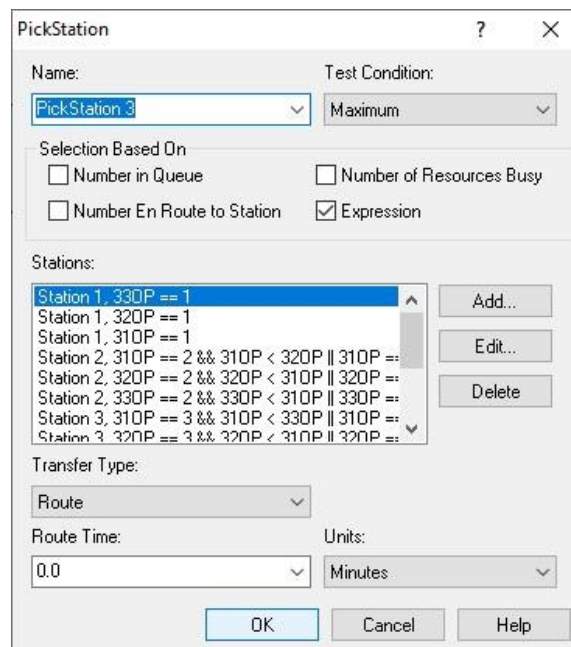


Figura 15 – Bloco PICKSTATION 3.

A separação dos trabalhos pelo número de operações, deve-se ao fato de que por serem atribuídos números de operações diferentes isso exige um número de atributos distintos, associados a cada trabalho. Se um trabalho precisar de efetuar apenas uma operação, é gerado apenas um número correspondente à estação onde terá de se deslocar, no entanto, se outro trabalho necessitar de 3 operações precisa de ter 3 números, o que implicará a deslocação para 3 estações diferentes. Essa diferença no número de operações leva a que sejam criadas condições diferentes nos diversos blocos PICKSTATION. As condições vão garantir que os trabalhos, independentemente da ordem dos números gerados anteriormente, cheguem à linha de produção por ordem crescente do estágio, criando assim um fluxo unidirecional. Por

exemplo, assumindo que são gerados os estágios produtivos 4, 3 e 6 para serem visitadas pelo trabalho, as condições criadas garantem que o trabalho visita primeiro a estação 3, depois a 4 e por último a 6.

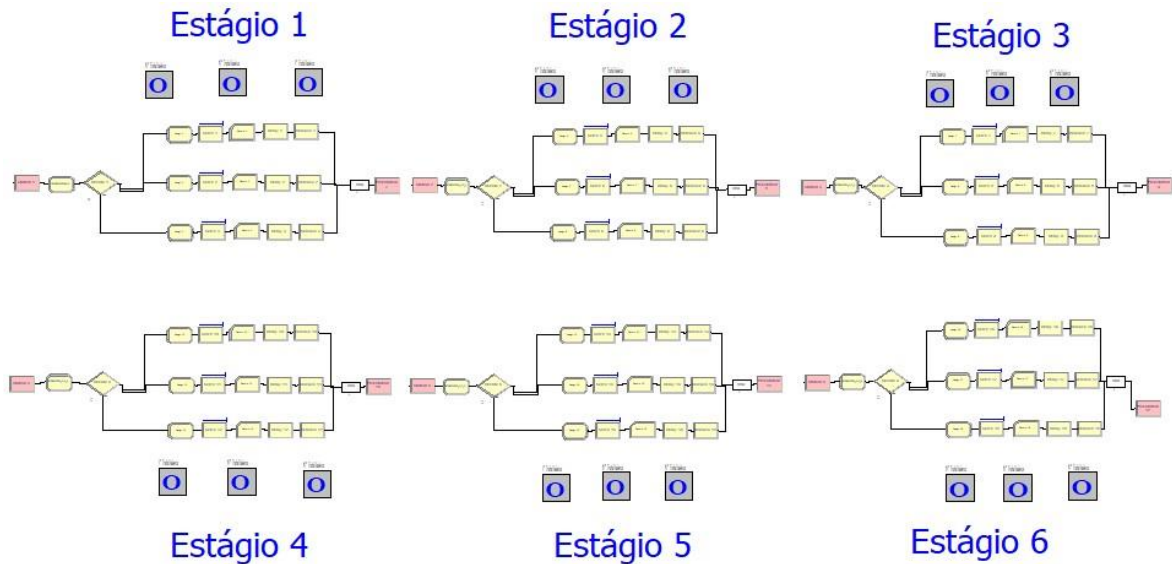


Figura 16 – Linha genérica.

A *linha genérica* é semelhante à *linha pura*, como ilustrado a Figura 16, com as seguintes alterações:

- No início de cada estágio produtivo, existe um bloco ASSIGN extra que tem a função de decrementar o número de operações restantes que o trabalho necessita de executar. Esse atributo (*op_resto*), que está visível na Figura 11, vai sendo decrementado sempre que um trabalho chegue a cada estação, como mostra Figura 17;
- No final de cada estágio, existe um bloco PICKSTATION que verifica, através de um conjunto de condições, se existe a necessidade de deslocar o trabalho para outro estágio ou, por outras palavras, para o bloco STATION correspondente ao estágio pretendido. Se existe, encaminha-a para o local correto, exemplificado pela Figura 18. Verifica também, se o atributo *op_resto* é equivalente a 0. Ao verificar essa condição, encaminha o trabalho para a expedição (*Station 7*), como demonstra a Figura 19.

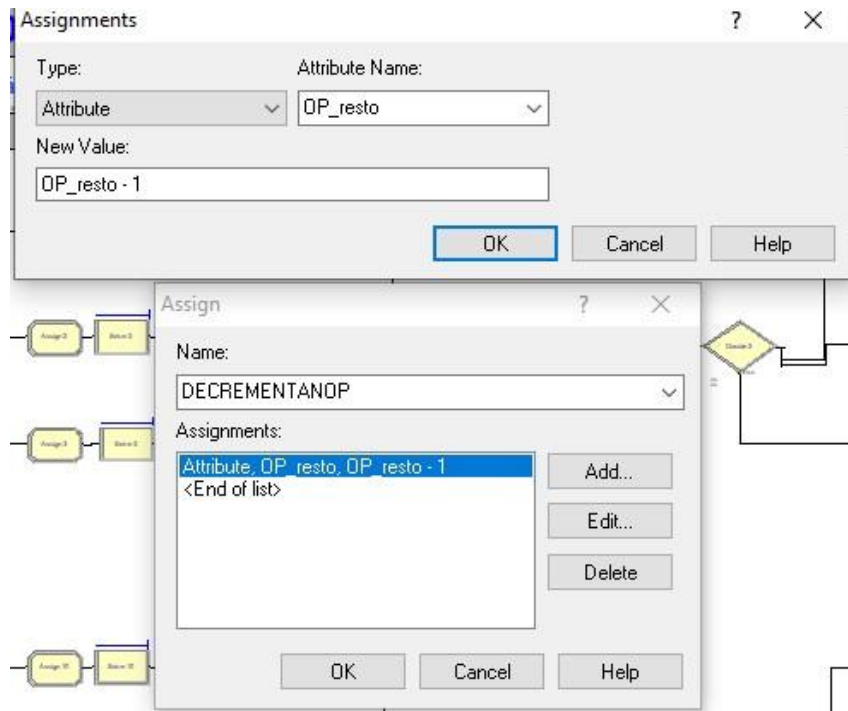


Figura 17 – Decremento do número de operações.

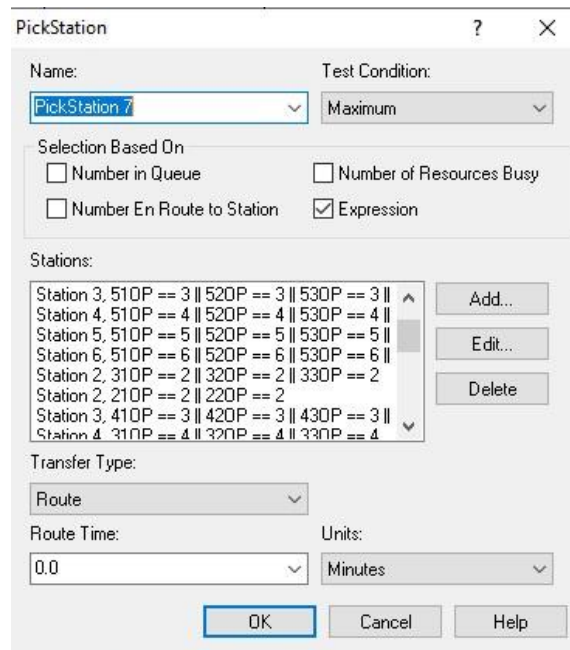


Figura 18 – Condições de escolha das estações.

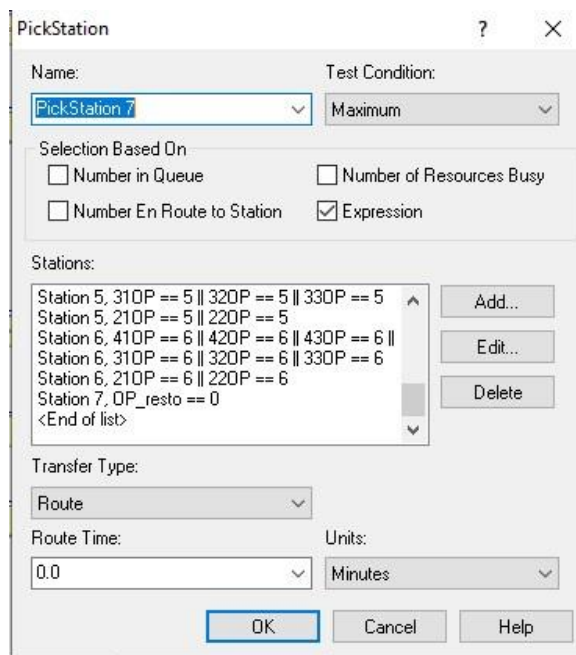


Figura 19 – Condições e verificação do número de operações.

Acabando as operações que cada trabalho tem de realizar, estes deslocam-se para a expedição, onde também são recolhidos os dados para as medidas de desempenho, como ilustrado na Figura 20.

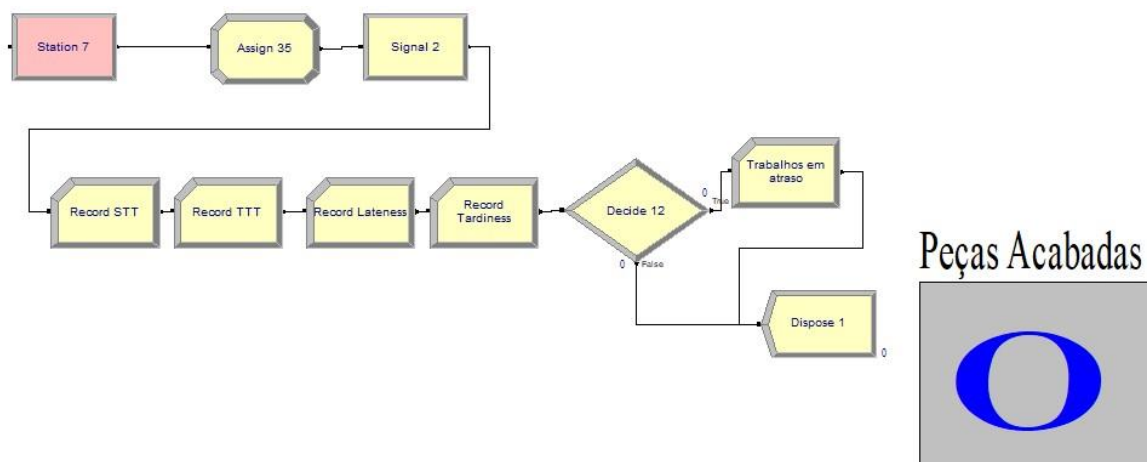


Figura 20 – Recolha de dados relativos às medidas de desempenho e expedição.

O bloco STT é usado para contabilizar o tempo passado que os trabalhos passam no sistema, tendo em conta o atributo criado no respetivo bloco ASSIGN. Os blocos *Lateness* e *Tardiness* efetuam o cálculo e registo destas duas medidas de desempenho para cada trabalho. O

bloco DECIDE serve para verificar se um trabalho conclui o seu processamento em atraso em relação à data de entrega (DD), incrementando o contador “Trabalhos em atraso” se o trabalho conclui após a sua data de entrega. Numa seção posterior deste relatório, serão explicadas as medidas de desempenho com maior detalhe.

A seção seguinte aborda as políticas de controlo usadas nos modelos de simulação considerados no estudo.

3.3. POLÍTICAS DE CONTROLO

As políticas de controlo são responsáveis pela forma em que os diversos intervenientes do sistema interagem entre si, determinando o desempenho do sistema. Nesta seção, são mencionadas e especificadas as políticas e regras utilizadas, nomeadamente:

- Políticas de alocação dos trabalhadores às máquinas;
- Regras de despacho dos trabalhos;
- Disponibilidade (em função de potenciais avarias) das máquinas;
- Política de lançamento de trabalhos em produção.

3.3.1. POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DOS TRABALHADORES

As políticas de alocação dos trabalhadores, ou *Where Rules*, são responsáveis por definir o local para onde o trabalhador deve ser deslocado dentro de um estágio de produção. Antes de se abordar com mais detalhe as políticas consideradas, convém mencionar como são definidos os trabalhadores neste enquadramento. Estes e as máquinas são representados como recursos e terão de ser declarados previamente no *Project Bar*, no separador *Basic Process*, como demonstra a Figura 21.

Resource - Basic Process									
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics
1	Trabalhador 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
2	Trabalhador 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
3	Trabalhador 3	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
4	Trabalhador 4	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
5	Trabalhador 5	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
6	Trabalhador 6	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
7	Trabalhador 7	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
8	Trabalhador 8	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
9	Trabalhador 9	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
10	Trabalhador 10	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
11	Trabalhador 11	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
12	Trabalhador 13	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
13	Trabalhador 14	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
14	Trabalhador 15	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
15	Trabalhador 16	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
16	Trabalhador 17	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
17	Trabalhador 18	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
18	Trabalhador 12	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		0 rows	✓
19	Maquina 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
20	Maquina 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
21	Maquina 3	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
22	Maquina 4	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
23	Maquina 5	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
24	Maquina 6	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
25	Maquina 7	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
26	Maquina 8	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
27	Maquina 9	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
28	Maquina 10	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
29	Maquina 11	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
30	Maquina 12	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
31	Maquina 13	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
32	Maquina 14	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
33	Maquina 15	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
34	Maquina 16	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
35	Maquina 17	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓
36	Maquina 18	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓

Figura 21 – Definição dos recursos nos modelos.

Para poder aplicar as políticas de alocação dos trabalhadores, é necessário recorrer à utilização de blocos VBA. Estes podem ser acedidos no *Project Bar*, no separador *Blocks* e permitem a construção de código que é executado sempre que uma entidade passa por ele. A Figura 22, mostra a utilização de um desses blocos nos modelos. Estes estão colocados no final de cada estágio, independentemente da política de controlo utilizada e executam o código correspondente ao bloco sempre que um trabalho passa pelo mesmo. Isto significa que após a realização de cada operação e seguindo uma política de Controlo Centralizado (*when rule*) é corrido o código VBA associado à regra de alocação do trabalhador – *where rule*. Por uma questão de legibilidade são mostradas apenas porções dos programas em questão, devido ao tamanho que apresentam.

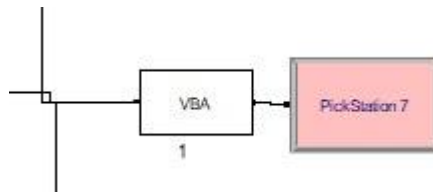


Figura 22 – Bloco VBA.

A primeira *Where Rule* a ser implementada é a regra *Shortest Total Processing Time (STPT)*, em que o trabalhador sempre que fica livre é alocado à estação (ou máquina) que tiver o somatório de todos os tempos de processamento dos trabalhos em fila de espera menor. Tendo em conta a definição desta regra, procede-se à implementação da mesma, em cada um dos blocos presentes na configuração do sistema produtivo. Começa-se por declarar a função do bloco respetivo (no caso a seguir, o primeiro bloco VBA) e a declaração da biblioteca SIMAN, que contém os métodos necessários, conforme mostra o seguinte excerto:

```
Private Sub VBA_Block_1_Fire()
Set x = ThisDocument.Model
Set y = x.SIMAN
(...)
```

Em seguida, é necessário fazer a ligação entre os objetos do modelo e o programa. Para tal, recorre-se ao método *SymbolNumber*. Para esta regra em específico, também foi necessário guardar os atributos que guardam os tempos de processamento de cada trabalho (L1, L2, ... L18):

```
'Guardar o ID de cada fila, pertencente a cada
máquina'

index1 = y.SymbolNumber("Maquina 1.Queue")

'repete-se para as restantes filas'
(...)

'Recursos dos trabalhadores'

indext1 = y.SymbolNumber("Trabalhador 1")

'repete-se para todos os recursos'
(...)

'SymbolNumber dos atributos L1...L18'
```

```
'L1--L18 são os atributos que guardam o valor do
tempo de processamento dos trabalhos'

indexL1 = y.SymbolNumber("L1")
(...)
```

Posteriormente, é necessária a presença de uma função que calcule o tempo total, de todos os trabalhos que se encontram em fila de espera de cada máquina. A *QueuedEntityAttributesSum* tem esse propósito, sendo necessário passar 2 argumentos: o identificador que corresponde à fila pretendida e o identificador correspondente ao atributo que se pretende somar. No exemplo da Figura 23, todos os trabalhos que se encontram na fila da Máquina 1, possuem tempos de processamento guardados no atributo *L1*. A mesma lógica é aplicada a todas as máquinas do estágio produtivo para obter o tempo total associado aos trabalhos em fila de espera de cada uma das máquinas:

```
'Soma dos valores do tempo de processamento de
cada fila, de cada máquina'

a = y.QueuedEntityAttributesSum(index1, indexL1)
b = y.QueuedEntityAttributesSum(index2, indexL2)
c = y.QueuedEntityAttributesSum(index3, indexL3)

'a lógica repete-se para todas as outras worksta-
tions'
(...)
```

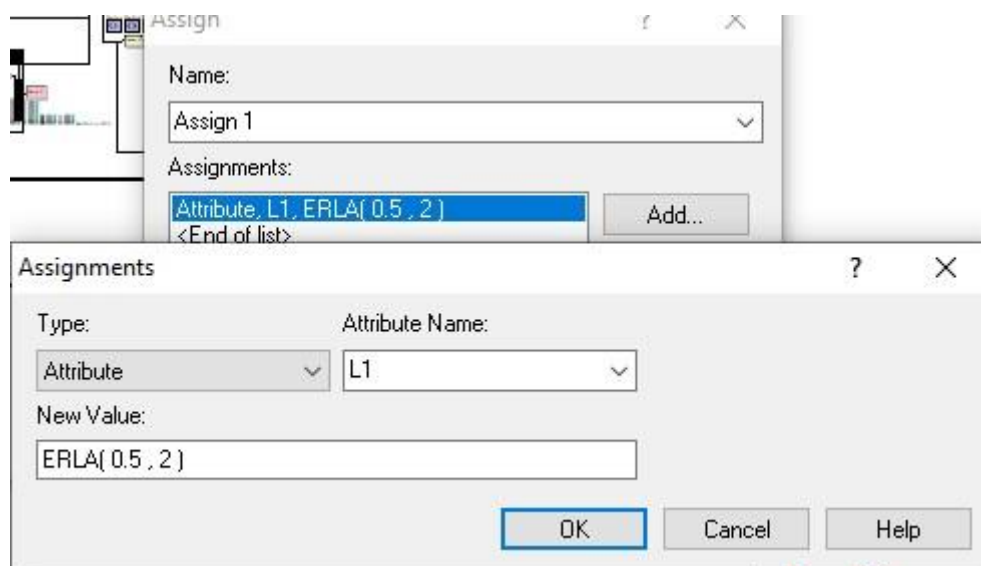


Figura 23 – Definição do tempo de processamento de cada trabalho.

Obtendo o tempo de processamento total de todos os trabalhos em espera, é necessário alocar o trabalhador à máquina que tem menor somatório de tempo. A alocação é realizada através da mudança da capacidade dos recursos associados aos trabalhadores. Como a cada máquina está associado um recurso virtual, há a necessidade de alterar a capacidade desses recursos virtuais de forma a fazer a alocação do recurso trabalhador a uma das máquinas. Para mudar a capacidade dos recursos virtuais, utiliza-se o método *ResourceCapacity*. Se um recurso possuir o valor '0', significa que não se encontra disponível, se estiver a '1' está disponível. Esta utilização de condições *If*, demonstrada pelo excerto de código seguinte, repete-se várias vezes no programa, para os mais variados casos que possam acontecer e para os diferentes estágios:

```
`Estágio 1`  
  
If a < b And a < c And a > 0 Then  
  
    y.ResourceCapacity(indext1) = 1  
    y.ResourceCapacity(indext2) = 0  
    y.ResourceCapacity(indext3) = 0  
  
Else  
(...)
```

A segunda regra aqui estudada é a *Longest Total Processing Time* (LTPT). Para este caso a o trabalhador é alocado à máquina cujos trabalhos em fila de espera apresentam maior tempo total de processamento. Tendo em conta esta matriz, procedeu-se de forma equivalente à regra STPT, no que toca à inicialização dos blocos e à utilização dos métodos *SymbolNumber* para obter os identificadores dos recursos, com a exceção dos tempos de processamento, exemplificado pelo próximo excerto. Neste caso, optou-se por obter os tempos de espera que cada trabalho terá quando chega à fila. Poderia ter sido feito da mesma forma que na regra STPT, ou seja, pelos tempos de processamento, mas optou-se por demonstrar um método diferente, em que a lógica é a mesma. Para isso, foi necessária a declaração de um outro atributo, como demonstra a Figura 24:

```
'Atributos associados aos tempos de espera de  
cada trabalho, em cada máquina. (1 á 18 = T1  
...T18)  
  
t1 = y.SymbolNumber("T1")  
(...)
```

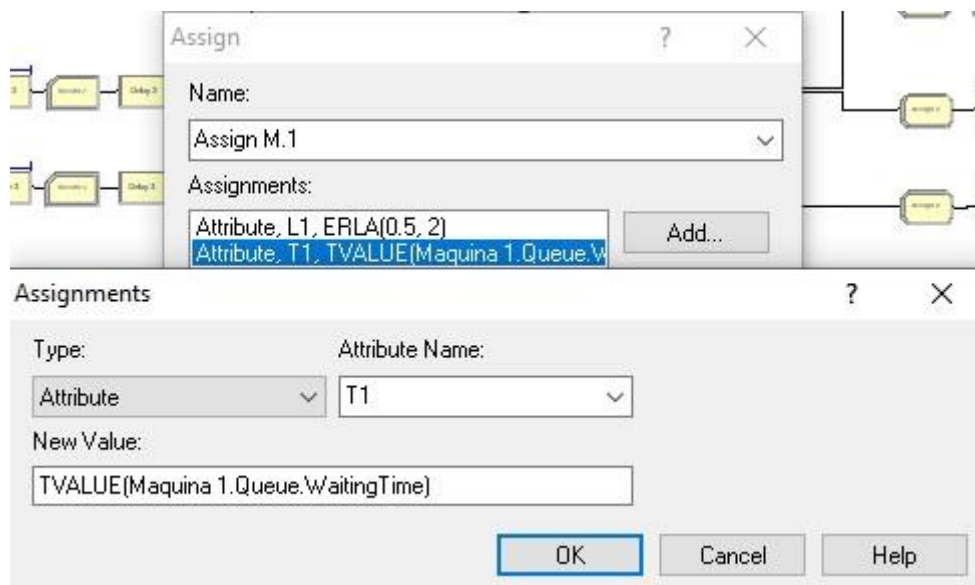


Figura 24 – Tempo de espera de cada trabalho.

A lógica por detrás é a mesma daquela que foi explicada na regra STPT, para os tempos de processamento. Os trabalhos que se dirigem para a Máquina 1 têm associadas um atributo *T1*, que neste caso guarda o tempo de espera que cada um terá na fila. O mesmo se verifica para os que vão para máquinas diferentes, apenas com nomes (*T2*, *T3*...) e máquinas (máquina 2, máquina 3...) diferentes. Como mostrado pelo excerto seguinte, utiliza-se o método *QueuedEntityAttributesSum*, para se somar todos os tempos de espera para de cada uma das filas de espera do estágio produtivo:

```
'Soma dos valores dos atributos correspondentes
ao tempo de espera de cada trabalho, em cada fi-
la'
'Maquina 1 a 18 - T1... T18.'

a = y.QueuedEntityAttributesSum(index1, t1)
(...)
r = y.QueuedEntityAttributesSum(index18, t18)
```

E por fim, a utilização de condições para todos os 6 estágios, tendo em conta todos os casos possíveis para cada uma, conforme mostra parcialmente o excerto seguinte:

```
'Estágio 1'

If a > b And a > c Then
```

```
'ResourceCapacity() define a capacidade da ma-
quina identificada por indext...'

    y.ResourceCapacity(indext1) = 1
    y.ResourceCapacity(indext2) = 0
    y.ResourceCapacity(indext3) = 0

    Else
    (...)

```

Avançando para a terceira regra, *Longest Number in Queue* (LNQ), que consiste na definição da máquina prioritária para a atribuição do trabalhador como sendo aquela que possui um maior número de trabalhos em fila de espera. Como tal, realizou-se as devidas declarações iniciais, feitas nos casos anteriores, tendo como única diferença o método *QueueNumberOfEntities*. Este é responsável por determinar quantos trabalhos se encontram numa fila de espera, exemplificado a seguir:

```
'Guardar o tamanho das filas de cada máquina'

a = y.QueueNumberOfEntities(index1)
(...)
r = y.QueueNumberOfEntities(index18)
(...)
```

Finalmente, a última regra, *First-In-First-Out* (FIFO). Esta definição faz com que a máquina prioritária, seja aquela cujo primeiro trabalho a chegar à fila de espera seja o prioritário. Como nas regras anteriores, faz-se as declarações iniciais para os recursos e, neste caso, utiliza-se também o método *QueueNumberOfEntities*, para obter o número de trabalhos de cada fila, conforme demonstra o exemplo seguinte:

```
'Guardar número de trabalhos em cada fila'

num1 = y.QueueNumberOfEntities(index1)
(...)
num18 = y.QueueNumberOfEntities(index18)
(...)
```

Seguidamente, é necessário obter uma forma de determinar qual o trabalho que chega primeiro às máquinas. Consultando as bibliotecas do Arena, descobriu-se duas funções que fazem o pretendido e que estão no excerto seguinte. Estas são a *QueueFirstEntity* que obtém

o primeiro trabalho que se encontra na fila e a *EntityStartTime*, cuja função é obter o valor temporal (no sistema da simulação), em que o trabalho entrou na fila:

```
'Estágio 1'  
  
If num1 > 0 Then  
  
    indexa = y.QueueFirstEntity(index1)  
    a = y.EntityStartTime(indexa)  
  
End If  
  
(...)
```

Através destes métodos é possível saber, dentro dos trabalhos que se encontram na primeira posição de cada fila, qual desses chegou primeiro ao estágio de produção através da aquisição do respetivo *StartTime*. Se o *StartTime* de um determinado trabalho for inferior aos outros, significa que o mesmo chegou primeiro à fila. Tendo sido obtido este valor para cada um dos trabalhos, acrescentam-se as condições necessárias para garantir que a prioridade seja cumprida:

```
'Estágio 1'  
  
If a < b And a < c And a > 0 Then  
  
    y.ResourceCapacity(indext1) = 1  
    y.ResourceCapacity(indext2) = 0  
    y.ResourceCapacity(indext3) = 0  
  
Else  
  
(...)
```

3.3.2. REGRAS DE DESPACHO DOS TRABALHOS

Além das 4 políticas responsáveis pela movimentação dos trabalhadores, aplicadas a todos os modelos de simulação, são definidas 2 regras que vão ordenar os trabalhos a serem executados, no espaço produtivo. As normas são as seguintes:

- FIFO;
- *First-In-System-First-Served* (FISFS)

A primeira regra, pertence a um conjunto de regras já definidas, por defeito, no *software*. Para fazer a devida aplicação, é necessário aceder ao *Project Bar*, no separador *Basic Process* e seleccionar *Queue*. A Figura 25, mostra como aplicar a regra corretamente, nas filas de cada máquina.

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Maquina 1.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Maquina 2.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Maquina 3.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Maquina 4.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Maquina 5.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Maquina 6.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Maquina 7.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Maquina 8.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Maquina 9.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Maquina 10.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Maquina 11.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Maquina 12.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Maquina 13.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Maquina 14.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Maquina 15.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Maquina 16.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Maquina 17.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Maquina 18.Queue	First In First Out	Attribute 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 25 – Ordenação dos despachos (FIFO).

A segunda regra, FISFS, como não existe por defeito, tem de ser criada. Esta norma, indica que os trabalhos que se encontram em espera, são ordenados pelo seu tempo de lançamento na linha de produção. Como tal, é necessário criar um bloco ASSIGN ou, acrescentar a um já existente, a fórmula de cálculo respetiva. A fórmula base utilizada, para todos os cenários é a seguinte, considerando o *Lead Time* de 5 unidades de tempo.

$$FISFS = Data\ de\ Entrega\ (DD) - Lead\ Time.NOP \quad (2)$$

Onde NOP se refere ao número de operações e o *Lead Time* ao tempo de percurso estimado do trabalho num estágio de produção.

Depois de serem definidas as fórmulas de cálculo para cada cenário, é imperativo alterar a regra de despacho, da mesma forma que foi executada anteriormente, como demonstra a Figura 26.

Queue - Basic Process					
	Name	Type	Attribute Name	Shared	Report Statistics
1	Maquina 1.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Maquina 2.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Maquina 3.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Maquina 4.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Maquina 5.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Maquina 6.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Maquina 7.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Maquina 8.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Maquina 9.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Maquina 10.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Maquina 11.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Maquina 12.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Maquina 13.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Maquina 14.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Maquina 15.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Maquina 16.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Maquina 17.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18▶	Maquina 18.Queue	Lowest Attribute Value	FISFS	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 26 – Ordenação dos despachos (FISFS).

3.3.3. DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS

As máquinas são recursos capacitados. Estes poderão estar sujeitos a avarias, as quais são tipicamente caracterizadas por dois parâmetros:

- *Mean Time Between Failures* (MTBF): representa a duração média entre avarias, de uma máquina;
- *Mean Time to Repair* (MTTR): consiste no tempo médio em que um equipamento demora a ser reparado.

Para este projeto, consideraram-se três situações distintas no que toca à disponibilidade das máquinas assumindo a distribuição exponencial para o tempo entre avarias e para o tempo de reparação:

- 100% de disponibilidade (sem avarias);
- 99% de disponibilidade (MTBF: 100 unidades de tempo; MTTR: 1 unidade de tempo);
- 99% de disponibilidade (MTBF: 400 unidades de tempo; MTTR: 4 unidades de tempo);

Para adicionar as avarias à máquina no Arena é necessário aceder ao *Project Bar*, no separador *Advanced Process* e seleccionar *Failures*, como mostra a Figura 27.

Failure - Advanced Process							
	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units	Uptime in this State only
1 ▶	Failure 1	Time	EXPO(400)	Minutes	EXPO(4)	Minutes	

Double-click here to add a new row.

Figura 27 – Failures.

Na aplicação destes fatores, é pretendido que seja testado um de cada vez, para todas as máquinas presentes no sistema. A utilização da função exponencial (EXPO) permite modelar as avarias de forma aleatória. Depois de definido o tipo de avaria, acede-se ao *spreadsheet* dos recursos, no separador *Basic Process* e acrescenta-se a avaria declarada em cada uma das colunas associadas aos recursos “Máquina”, clicando na coluna *Failures* (ver Figura 28).

Resource - Basic Process										Failures	
	Name	Type	Capacity	Busy / Hour	Idle / Hour	Per Use	StateSet Name	Failures	Report Statistics	Failure Name	Failure Rule
19	Maquina 1	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
20	Maquina 2	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
21	Maquina 3	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
22	Maquina 4	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
23	Maquina 5	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
24	Maquina 6	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
25	Maquina 7	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
26	Maquina 8	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
27	Maquina 9	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
28	Maquina 10	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
29	Maquina 11	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
30	Maquina 12	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
31	Maquina 13	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
32	Maquina 14	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
33	Maquina 15	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
34	Maquina 16	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		
35	Maquina 17	Fixed Capacity	1	0.0	0.0	0.0		1 rows	✓		

Figura 28 – Aplicação das avarias.

De notar, que ao seleccionar a coluna *Failures* aparece um novo menu, como demonstra a Figura 28, no lado direito da imagem. Este menu permite seleccionar a avaria pretendida e definir um tipo de regra associada à mesma, que neste caso, foi a regra *Wait*. Isto significa, que a avaria só ocorre numa determinada máquina após o processamento dos trabalhos (caso estejam a ser processados).

Além dos cenários descritos, onde a regra de alocação – *when rule* é aplicada segundo as diretrizes de um Controlo Centralizado, foram também considerados alguns cenários onde a *when rule* é dependente das avarias. Ou seja, a realocação do operador é realizada após a conclusão de uma operação ou durante uma avaria. Se uma das máquinas sofrer uma avaria, o trabalhador pode ser realocado a uma outra onde isso não acontece, de acordo com a *where rule* em causa. Quando ocorrem duas avarias em simultâneo, o trabalhador desloca-se para a que não se encontra nesse estado. Isto visa comparar duas formas de encarar os momentos de avaria e o impacto que têm no sistema. Nos outros casos, os trabalhadores não realizavam nenhum movimento específico na ocorrência de uma avaria. Para tal, é necessário utilizar uma função no código VBA que determine quando é que uma máquina avaria:

```
'inicialização do método que verifica se há avarias em cada uma das máquinas'

'indexf1...f18 são os símbolos dos recursos Máquina 1...18'

fail1 = y.ResourceFailures(indexf1)
(...)
fail18 = y.ResourceFailures(indexf18)
(...)
```

Se uma máquina não se encontra num momento de avaria, a variável que aponta à função *ResourceFailures* assume um valor de 0. Sabendo isto, implementa-se um novo conjunto de condições que verificam o estado das máquinas e que alteram as capacidades dos recursos “Trabalhador”, simulando a sua movimentação:

```
'Workstation 1
  'Se há avaria na máquina 1, o trabalhador
desloca-se para uma das outras máquinas (de
acordo com a regra)
  'Se há 2 avarias a ocorrer ao mesmo tempo,
desloca-se para a unica que nao esta em momento
de avaria.
  ' a logica repete-se para as outras estações

If fail1 <> 0 And b < c Then

y.ResourceCapacity(indext1) = 0
y.ResourceCapacity(indext2) = 1
y.ResourceCapacity(indext3) = 0

Else
(...)
```

3.3.4. POLÍTICA DE LANÇAMENTO DE TRABALHOS EM PRODUÇÃO

No que toca á forma de como os trabalhos são lançados em produção, existem diferentes abordagens. Estes podem ser lançados de forma imediata, ou seja, logo após a chegada da encomenda do cliente ao sistema de produção, ou de forma controlada, levando em consideração a carga que existe no sistema de forma a evitar eventuais congestionamentos. Uma das abordagens com melhor desempenho em termos de lançamento controlado é o *Workload Control* (Land & Gaalman 1995), tal como foi descrito na seção 2.2. Neste trabalho, considera-se que o lançamento de todos os trabalhos em produção é realizado de forma imediata após a chegada do trabalho ao sistema.

3.4. PLANO EXPERIMENTAL E INDICADORES DE DESEMPENHO

Na base de todos os tópicos explicados nas seções anteriores, foi definido um plano experimental que representa um fatorial completo de todas as especificações das simulações realizadas. A Tabela 7 apresenta os fatores experimentais testados e os níveis a que estes foram testados.

Além deste plano base, composto por 72 cenários diferentes, considerou-se um conjunto de situações que alargam este plano. Pretendeu-se estudar o impacto da movimentação dos trabalhadores no final do processamento do trabalho, tendo em conta as máquinas que se encontram avariadas no momento da alocação do trabalhador.

Para o efeito, foi decidido utilizar os 3 tipos de configurações (Estágio único com máquinas paralelas, Linha Pura e Linha Genérica), a *where rule* STPT, a regra de despacho FIFO, os 2 tipos de avarias mencionados e a *when rule* com o acréscimo aqui referido. Isto perfaz, com este plano adicional, um total de 78 cenários.

Tabela 7 – Plano experimental base.

Fatores experimentais	Níveis		
Configuração	Estágio único com máquinas paralelas (24 cenários)	Linha pura com máquinas paralelas (24 cenários)	Linha genérica com máquinas paralelas (24 cenários)
Políticas de alocação (<i>Where rule</i>)	LNQ, LTPT, FIFO, STPT	LNQ, LTPT, FIFO, STPT	LNQ, LTPT, FIFO, STPT
Políticas de alocação (<i>When rule</i>)	Controlo Centralizado	Controlo Centralizado	Controlo Centralizado
Políticas de despacho	FIFO, FISFS	FIFO, FISFS	FIFO, FISFS
Disponibilidade das máquinas	100%; 99% (MTBF = 100 min; MTTR = 1 min) e 99% (MTBF = 400 min; MTTR = 4 min)	100%; 99% (MTBF = 100 min; MTTR = 1 min) e 99% (MTBF = 400 min; MTTR = 4 min)	100%; 99% (MTBF = 100 min; MTTR = 1 min) e 99% (MTBF = 400 min; MTTR = 4 min)

Após a definição do plano experimental, foi necessário definir indicadores de desempenho a utilizar, de modo a ser possível comparar os diferentes cenários experimentais aqui apresentados resultantes das diferentes políticas de controlo e ambientes produtivos considerados. Foram definidos 4 indicadores-chave para esse efeito:

- *Tempo no espaço fabril (Shop Throughput Time - STT)*: consiste no tempo que medeia entre o lançamento do trabalho para o espaço fabril (entrada em produção) e a sua conclusão. considera-se que os trabalhos são lançados em produção imediatamente após a sua chegada ao sistema;
- *Percentagem de trabalhos em atraso*: são considerados trabalhos em atraso, aqueles que concluem o seu processamento após a sua data de entrega. Sabendo quantos trabalhos concluíram em atraso e o número total de trabalhos produzidos, calcula-se a percentagem de trabalhos em atraso;
- *Atraso (Lateness)*: é uma medida que pretende quantificar os atrasos de cada trabalho no sistema. É obtido através da diferença entre a data efetiva de conclusão do trabalho e a data de entrega. Se o seu valor é negativo, então significa que terminou o seu processamento antes do tempo, podendo ser denominado por atraso negativo, se for positivo, significa que será entregue em atraso ao cliente.
- *Lateness condicionada (Tardiness)*: É um indicador baseado no *lateness*, que quantifica apenas os atrasos “positivos”.

Depois de serem realizadas as simulações, o Arena possui a capacidade de gerar relatórios automáticos. Nesses relatórios são fornecidos dados calculados por defeito do próprio sistema, sendo possível também incluir dados personalizados pelos utilizadores. Para tal, é requerido incluir os mesmos num *spreadsheet* denominado *Statistic*, localizado no *Project Bar*, no separador *Advanced Process*. Para este caso, incluiu-se os indicadores referidos anteriormente, calculados a partir dos dados recolhidos pelos blocos RECORD presentes no sistema (ver Figura 29).

Statistic - Advanced Process							
	Name	Type	Tally Name	Tally Output File	Expression	Report Label	Output File
1	% Trabalhos em atraso	Output	Tally 2		$(NC(\text{Trabalhos em atraso})/EntitiesOut(Pecas))*100$	% Trabalhos em atraso	
2	Lateness	Output	Tally 3		TAVG(Record Lateness)	Lateness	
3	Tardiness	Output	Tally 4		TAVG(Record Tardiness)	Tardiness	
4	Shop Throughput Time	Tally	Record STT			Shop Throughput Time	

Double-click here to add a new row.

Figura 29 – Estatísticas.

Depois de definidos os indicadores e como devem ser calculados, os relatórios das simulações apresentam esses mesmos dados conforme mostra, parcialmente, a Figura 30. Os resultados destes relatórios incluem a média e o *half width* (intervalo de confiança de 95%).

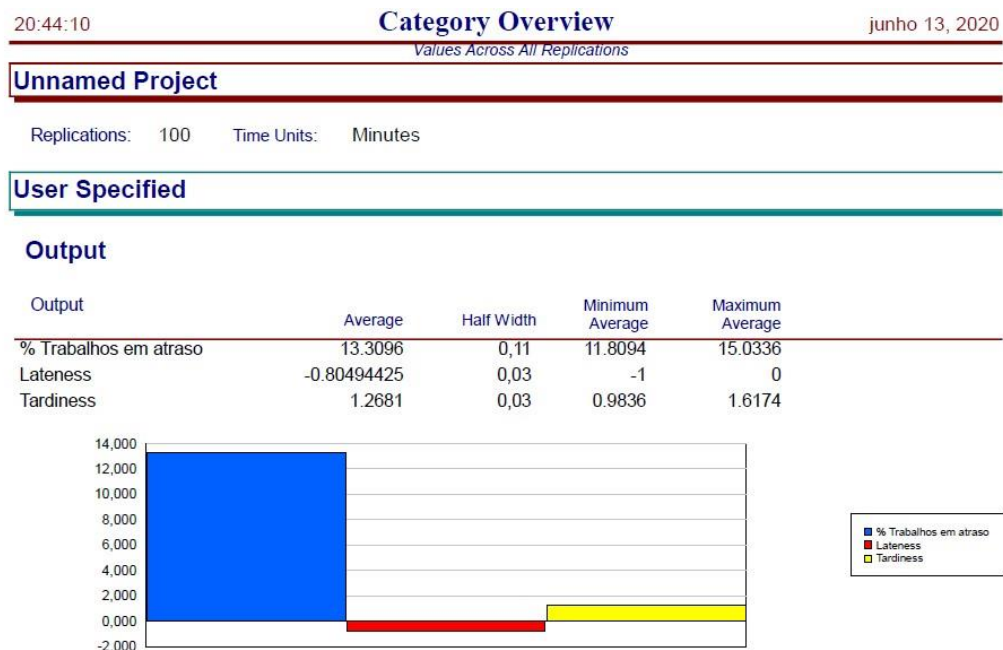


Figura 30 – Exemplo de um relatório do Arena.

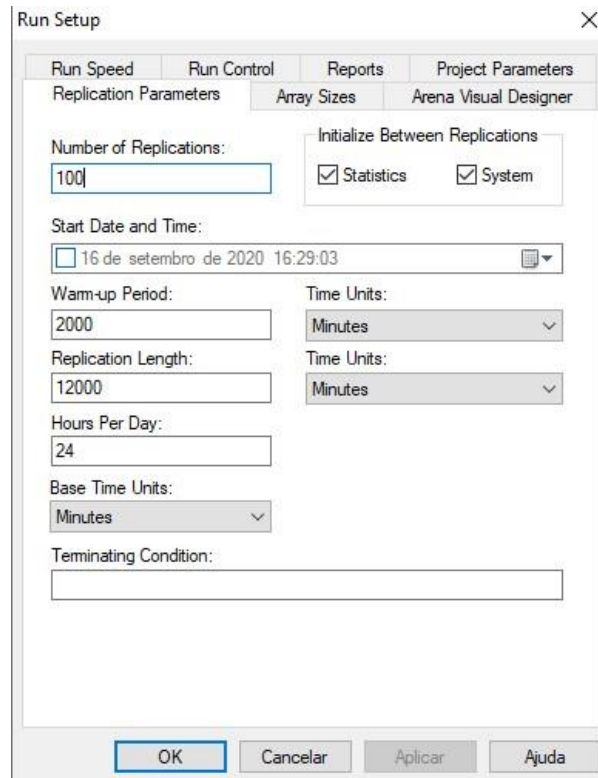


Figura 31 – Parâmetros das simulações.

Por fim, apresentam-se as condições de simulação usadas na Figura 31, a qual mostra o número de réplicas realizadas para cada cenário (100), o período de *warm-up* (2000 unidades de tempo) e a duração de cada réplica (12000 unidades de tempo). Estes parâmetros permitem retirar resultados em regime estacionário, com erros relativamente baixos ($\ll 5\%$).

O próximo capítulo é dedicado à apresentação dos resultados obtidos, através da realização das diversas simulações e à análise dos mesmos.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Após a realização das simulações para os 78 cenários referidos, é fundamental fazer a análise dos resultados retirados dos relatórios automáticos do Arena. Assim na seção 4.1 são apresentados os resultados para o *estágio único com máquinas paralelas*, na seção 4.2 apresentam-se os resultados para a *linha pura* e na seção 4.3 expõem-se os resultados para a *linha genérica*. Posteriormente, nas seções 4.4 e 4.5, analisa-se o impacto que a disponibilidade das máquinas, dependente de avarias, tem no desempenho do sistema e o impacto da alocação dos trabalhadores tendo em consideração as máquinas que se encontram avariadas no momento da alocação. Todos os resultados são apresentados em anexo com indicação da média e do intervalo de confiança de 95%. Nesta seção encontram-se as figuras resumo obtidas com base nas tabelas de dados em anexo.

4.1. RESULTADOS PARA ESTÁGIO ÚNICO COM MÁQUINAS PARALELAS

Nesta seção apresentam-se os resultados para a configuração estágio único com máquinas paralelas, assumido uma disponibilidade de 100% das máquinas. Esta seção apresenta estes resultados para as regras de despacho FISFS e FIFO, respetivamente.

As Tabelas 8 e 9, localizadas nos Anexos, mostram os resultados dos indicadores de desempenho, para as regras de despacho FISFS e FIFO, respetivamente.

A Figura 32 resume os resultados obtidos em forma de gráficos para um único estágio de produção e com a disponibilidade das máquinas a 100%. Fazendo uma primeira análise sobre estes resultados, pode-se concluir o seguinte relativamente ao desempenho das regras de despacho e das regras de alocação dos trabalhadores:

Regra de despacho: não parece haver diferenças significativas de desempenho entre regras de despacho no que se refere às diferentes medidas de desempenho (STT, trabalhos em atraso, *lateness* e *tardiness*). Verifica-se um desempenho igual entre regras de despacho (por exemplo, nas regras de alocação LTPT e STPT, aplicando as regras de despacho FIFO e FISFS, obtêm-se os mesmos resultados).

Regras de alocação dos trabalhadores (*where rules*): a regra com pior desempenho relativamente às diferentes medidas de desempenho é a LNQ, sendo que as restantes regras apresentam resultados idênticos, ainda que ligeiramente melhores na regra STPT.

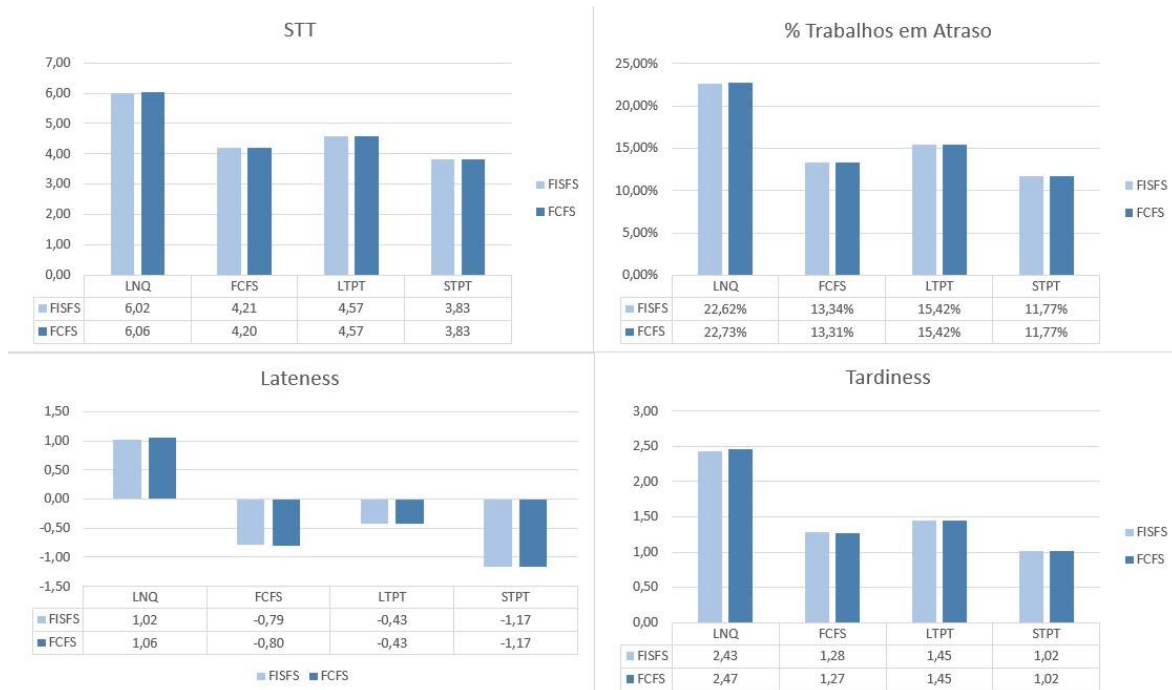


Figura 32 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – Estágio único com máquinas paralelas.

4.2. RESULTADOS PARA A LINHA PURA COM MÁQUINAS PARALELAS (*PURE FLOW SHOP*)

Seguidamente são demonstrados os resultados dos cenários do tipo *Pure Flow Shop*, para uma disponibilidade das máquinas de 100%. Mais uma vez, as seções estarão organizadas, pelas regras de despacho (FISFS e FIFO). As Tabelas 10 e 11, presentes nos Anexos, representam os respetivos valores de *performance* para o cenário do tipo linha pura (*Pure Flow Shop*), ordenados pelas regras de despacho FISFS e FIFO, respetivamente.

Analisando os resultados dispostos nas tabelas anteriores, verifica-se um aumento do tempo que os trabalhos passam no sistema, como seria de esperar, resultante do aumento do número de estágios de produção. Também é possível confirmar uma grande redução da quantidade de trabalhos em atraso, que se reflete nos valores dos indicadores *lateness* e *tardiness*. A

redução dos trabalhos em atraso deve-se ao facto de que a data de entrega é calculada tendo em conta um *Lead Time* de 5 unidades de tempo multiplicado pelo número de operações efetuadas. No Estágio único com máquinas paralelas, por só haver um estágio de produção, cada trabalho tem 5 unidades de tempo para ser terminado, enquanto que na *Pure Flow Shop*, esse tempo será de 30 unidades de tempo, por ter 6 estágios e pelo fato de que os trabalhos passam pelos estágios na sua totalidade. Seguem-se algumas considerações relativamente ao desempenho das regras implementadas:

Regras de despacho: Não existem diferenças significativas entre as diferentes regras de despacho.

Regras de alocação (*where rules*): As regras LNQ e LTPT apresentam a maior percentagem de trabalhos em atraso, refletindo-se nos valores de atrasos positivos (*tardiness*). Enquanto que a regra LNQ, apresenta maior tempo médio no sistema e piores valores de *lateness*. A regra STPT continua a ser a *where rule* mais eficiente.

A Figura 33, permite uma visualização mais clara do que foi demonstrado nas tabelas anteriores e do que foi dito neste parágrafo.

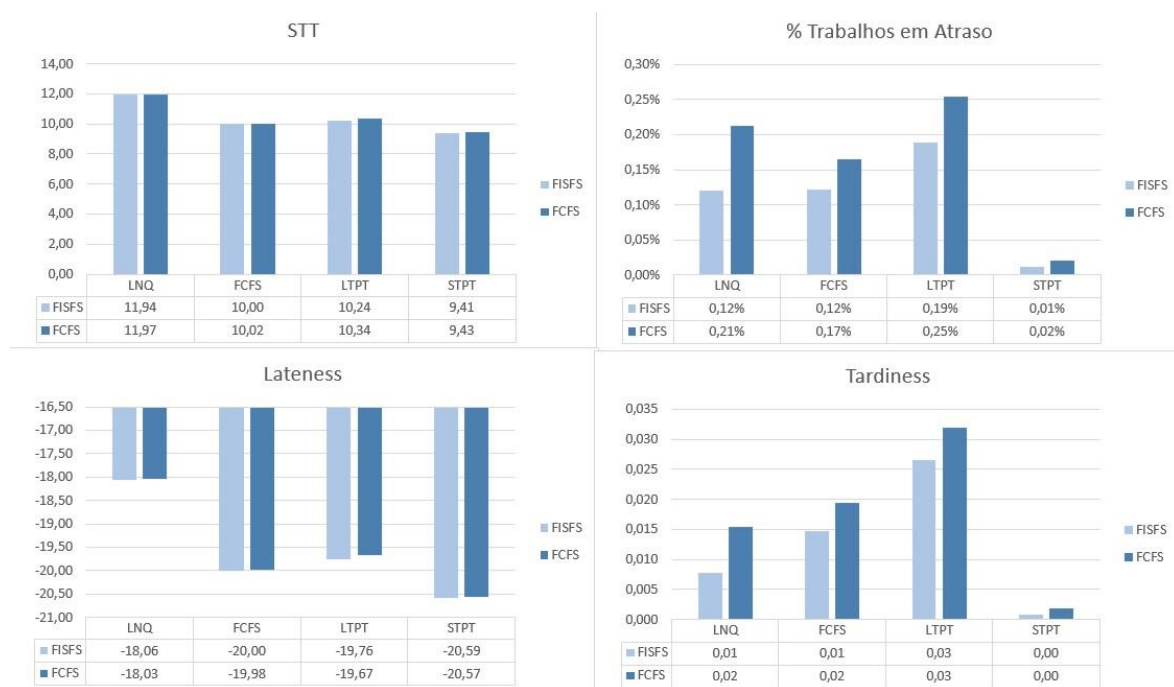


Figura 33 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – *Linha pura com máquinas paralelas*.

4.3. RESULTADOS PARA A LINHA GENÉRICA COM MÁQUINAS PARALELAS (*FLEXIBLE FLOW SHOP*)

Para finalizar os cenários com 100% de disponibilidade, são demonstrados os resultados dos cenários do tipo Linha genérica com máquinas paralelas. Mais uma vez, os resultados estão organizados, pelas regras de despacho (FISFS e FIFO). As Tabelas 12 e 13, dispostas na seção dos Anexos, mostram os resultados dos indicadores de *performance* do sistema, para esta situação específica.

Em comparação com a *linha pura*, a *linha genérica* apresenta valores mais elevados de atrasos nos trabalhos, explicado pela forma de como é definida a data de entrega de cada trabalho. Seguem-se alguns comentários em relação às regras aplicadas:

Regras de despacho: Continua a não haver grandes diferenças nos resultados, de uma forma geral, entre as 2 regras.

Regras de alocação (*where rules*): Para esta configuração física, verificou-se que a regra de alocação dos trabalhadores FIFO apresentou piores resultados. No lado oposto, a regra STPT apresentou sempre os melhores indicadores de desempenho.

A Figura 34 permite uma clarificação do que foi dito, através de exposição gráfica.

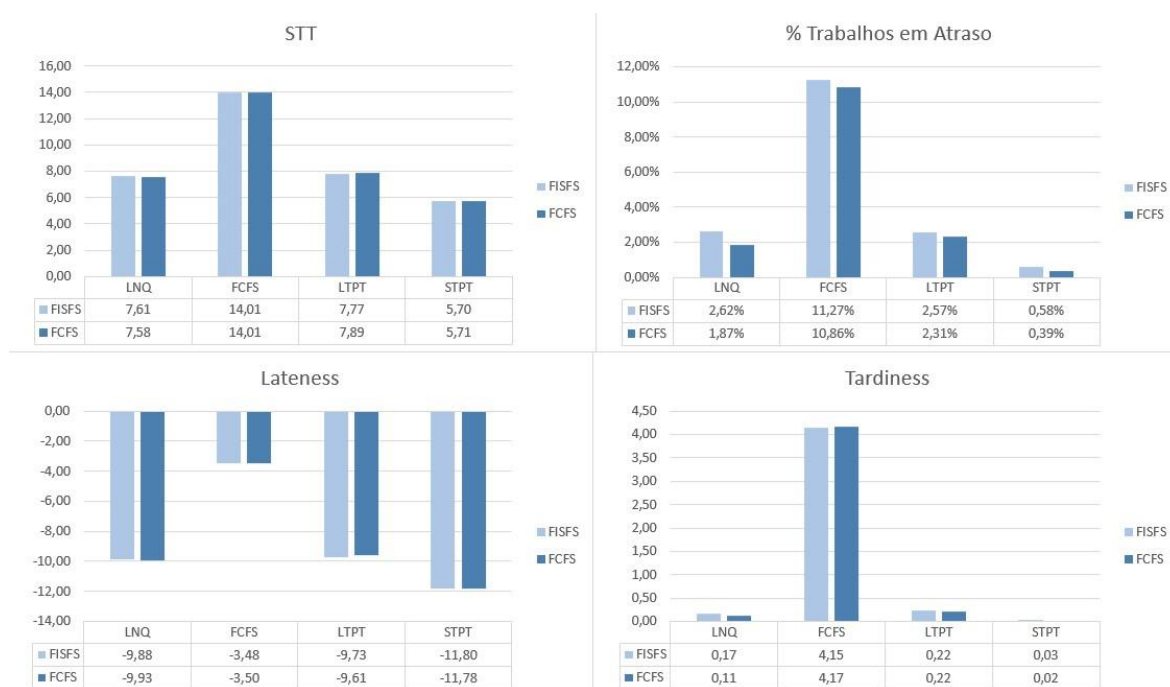


Figura 34 – Representação gráfica dos indicadores de desempenho – Linha genérica com máquinas paralelas.

4.4. IMPACTO DO NÍVEL DE DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS – MTBF = 100 UNIDADES DE TEMPO; MTTR = 1 UNIDADE DE TEMPO (1º PADRÃO DE AVARIAS)

Abordando agora a ocorrência de avarias nos sistemas, começa-se por apresentar os resultados para os cenários de Estágio único com máquinas paralelas, depois para a linha pura e por fim para a linha genérica.

4.4.1. RESULTADOS PARA ESTÁGIO ÚNICO COM MÁQUINAS PARALELAS

Novamente, os resultados estão organizados por regras de despacho (FISFS e FIFO). As Tabelas 14 e 15, nos Anexos, fornecem os dados referentes aos índices de desempenho deste sistema.

Com a aplicação de avarias nas máquinas, verificou-se um aumento ligeiro dos valores de tempo no sistema, número de trabalhos em atraso e nos indicadores de *lateness* e *tardiness*. Esta deterioração era esperada, uma vez que provocam interrupções no fluxo de produção e perdas de capacidade, fazendo com que o tempo médio dos trabalhos no sistema, os atrasos e a duração dos mesmos aumentem.

Regras de despacho: Nota-se uma igualdade de valores nas regras de alocação LNQ e FIFO, entre as 2 regras de despacho aplicadas, para este caso. As diferenças continuam a não ser significativas.

Regras de alocação (*where rules*): O comportamento das regras continua a ser o mesmo, comparando com o cenário de Estágio único com máquinas paralelas com 100% de disponibilidade. A regra LNQ demonstra ter um pior desempenho, enquanto que a regra STPT continua a ser a que possui melhores indicadores.

Demonstram-se agora os resultados dos cenários *Pure Flow Shop*, para uma disponibilidade das máquinas de 99%, seguindo a lógica anterior.

4.4.2. RESULTADOS PARA A LINHA PURA COM MÁQUINAS PARALELAS

Mais uma vez, os resultados estão organizados por regras de despacho (FISFS e FIFO). As Tabelas 16 e 17, presentes na seção dos Anexos, mostram a *performance* destes sistemas em específico.

Mais uma vez, verifica-se os efeitos causados pela inclusão de avarias, causando um impacto na performance do sistema. Seguem-se alguns comentários sobre as regras aplicadas:

Regras de despacho: As diferenças causadas continuam a ser pequenas.

Regras de alocação (*where rules*): O comportamento das regras continua a ser o mesmo, comparando com o cenário de Estágio único com máquinas paralelas com 100% de disponibilidade. A regra STPT continua a ser a que possui melhores indicadores.

4.4.3. RESULTADOS PARA A LINHA GENÉRICA COM MÁQUINAS PARALELAS

Em seguida, abordam-se os resultados dos cenários *Flexible Flow Shop*, para a mesma disponibilidade. As Tabelas 18 e 19, localizadas nos Anexos, revelam os resultados dos índices de desempenho definidos, para esta situação.

Com a introdução de avarias neste cenário, mais uma vez verificou-se que ocorreu uma deterioração nos indicadores de desempenho. Seguem-se alguns comentários sobre as regras aplicadas:

Regras de despacho: Diferenças continuam a ser diminutas.

Regras de alocação (*where rules*): A regra de movimentação dos operários STPT, continua a ser a que apresenta melhores resultados na globalidade. No entanto a regra FIFO, é a que apresenta piores resultados, verificando um comportamento idêntico ao cenário de 100% disponibilidade.

Na próxima seção (4.5), irão ser comparados, graficamente, os valores respetivos dessa avaria com os mencionados nesta seção (4.4).

4.5. IMPACTO DO NÍVEL DE DISPONIBILIDADE DAS MÁQUINAS – MTBF = 400 UNIDADES DE TEMPO; MTTR = 4 UNIDADES DE TEMPO (2º PADRÃO DE AVARIAS)

Seguindo a mesma lógica das seções anteriores, abordam-se os resultados do segundo caso de aplicação de avarias nos sistemas, começando pelos cenários do tipo *Estágio único com máquinas paralelas*.

4.5.1. RESULTADOS PARA ESTÁGIO ÚNICO COM MÁQUINAS PARALELAS

As Tabelas 20 e 21, presentes nos Anexos, mostram os índices de desempenho para este cenário de simulação.

Com a aplicação de uma avaria menos frequente e de maior duração, verificou-se um agravamento das medidas de desempenho. Seguem-se alguns comentários relativamente às regras aplicadas:

Regras de despacho: Mais uma vez, nota-se uma igualdade de valores nas regras de alocação LNQ e FIFO, entre as 2 regras de despacho aplicadas, tal como na situação de avarias anterior.

Regras de alocação (*where rules*): A regra LNQ continua a demonstrar ter o pior desempenho, mantendo o comportamento para este tipo de configuração. A regra STPT, mais uma vez, é a que apresenta melhores índices.

A seguir, são demonstrados os resultados dos cenários de Linha Pura, com o mesmo padrão de avarias.

4.5.2. RESULTADOS PARA LINHA PURA COM MÁQUINAS PARALELAS

As Tabelas 22 e 23, nos Anexos, demonstram os respectivos valores de desempenho para o caso simulado.

O agravamento dos valores continua a ser constante para este cenário físico. Seguem-se algumas observações sobre a aplicação das regras, para este caso:

Regras de despacho: As diferenças causadas continuam a ser pequenas.

Regras de alocação (*where rules*): Para este cenário de Linha Pura, a regra LNQ continua a dividir os piores resultados na globalidade com a regra LTPT. A regra STPT continua a ser a *where rule* mais eficiente.

Finalmente, são demonstrados os resultados dos cenários de Linha Genérica, para a mesma disponibilidade.

4.5.3. RESULTADOS PARA LINHA GENÉRICA COM MÁQUINAS PARALELAS

As Tabelas 24 e 25, presentes na seção dos Anexos, mostram os indicadores de desempenho referentes a este cenário em específico.

Seguem-se alguns comentários sobre as regras utilizadas para o cenário em questão:

Regras de despacho: O impacto destas regras, continua a ser pequeno.

Regras de alocação (*where rules*): Mantendo a tendência, a regra FIFO continua a apresentar os piores resultados, para os cenários de *Flexible Flow Shop*. A regra STPT, apresenta sempre os melhores resultados.

Para clarificar, seguem-se algumas comparações dos índices de desempenho entre os 2 tipos de avarias aplicadas ao sistema, utilizando como exemplo, a regra de despacho FIFO e as

várias configurações produtivas. A Figura 35 mostra lado a lado, para os cenários do tipo Estágio único com máquinas paralelas, os valores observados entre a utilização dos dois padrões de avarias.

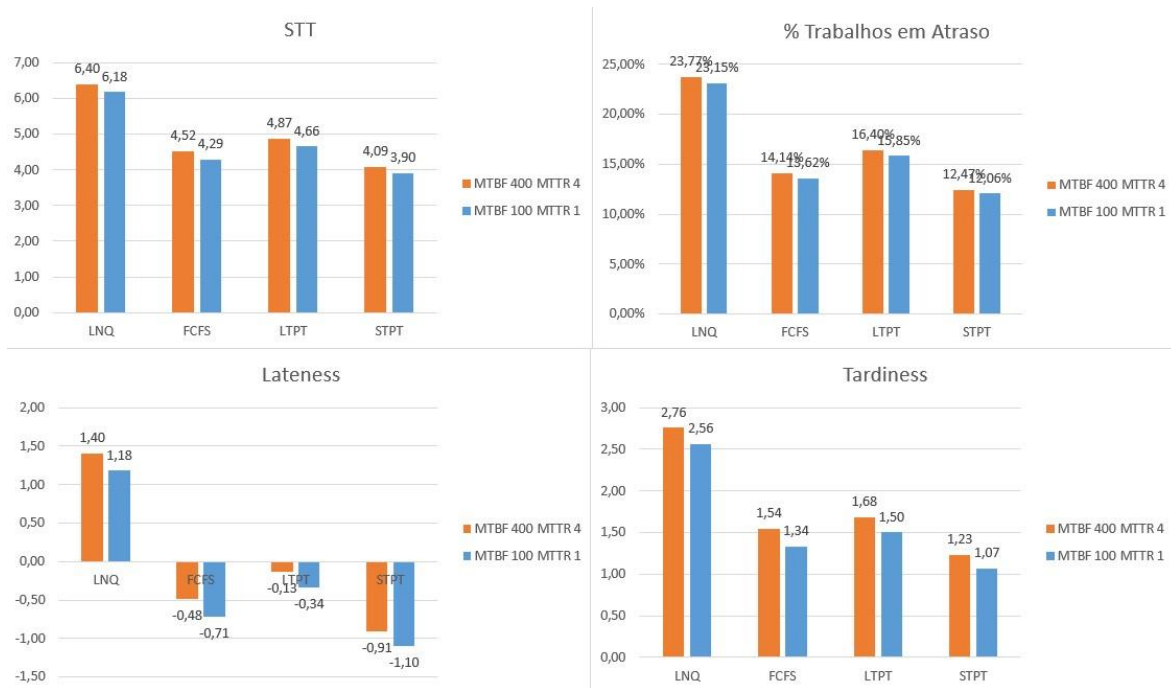


Figura 35 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Estágio único com máquinas paralelas.

Pela análise destes 4 gráficos, onde se comparam os valores dos vários indicadores, conclui-se que a aplicação da avaria mais frequente e de menor duração resulta num melhor desempenho do sistema, como seria de esperar, ainda que ligeira. Seguem-se agora os gráficos para os sistemas do tipo *Pure Flow Shop*, que acompanham esta tendência.

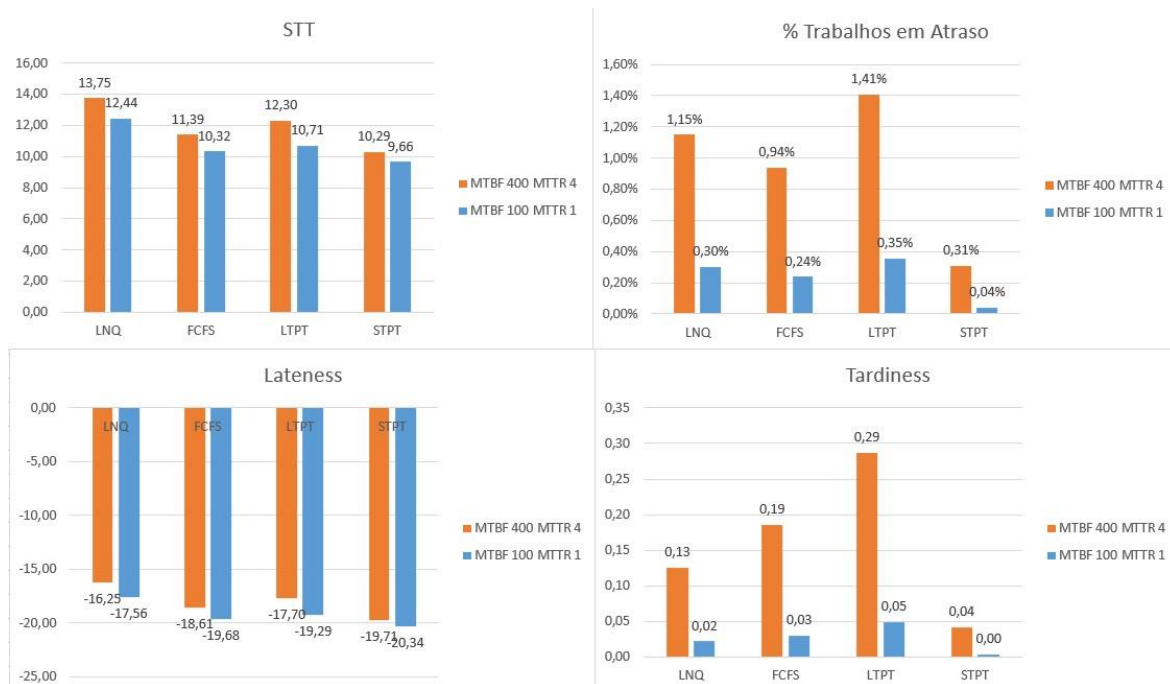


Figura 36 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Linha Pura com máquinas paralelas.

Através da observação da Figura 36, compreende-se uma maior diferença entre os valores de STT e nos valores de *lateness*, comparando com o cenário de Estágio único com máquinas paralelas. Também se nota uma grande diferença na percentagem de trabalhos em atraso aplicando a regra de alocação LTPT, entre as duas versões de avarias. Para concluir esta demonstração, a Figura 37 mostra graficamente as diferenças existentes, para o cenário do tipo Linha Genérica.

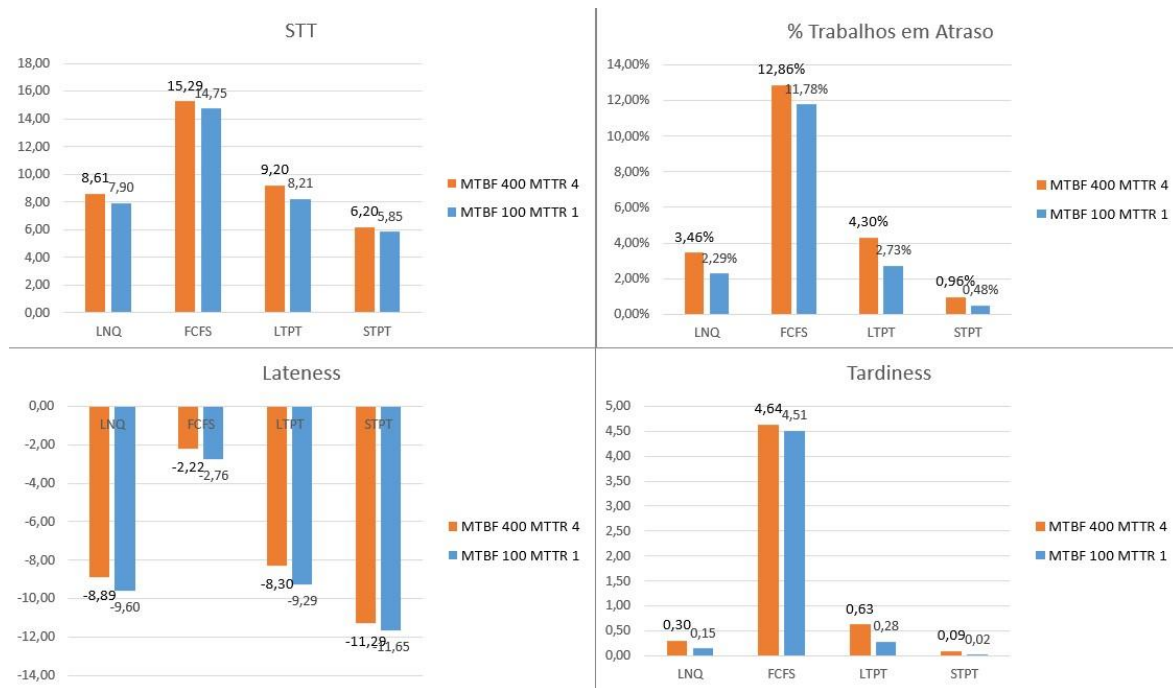


Figura 37 – Comparações entre índices de desempenho nos cenários de Linha genérica com máquinas paralelas.

4.6. IMPACTO DA MOVIMENTAÇÃO DOS OPERÁRIOS NA OCORRÊNCIA DE AVARIAS

Nos cenários experimentais anteriores, quando ocorriam avarias nas máquinas o trabalhador poderia ser deslocado para uma máquina avariada, o que levaria a uma perda de capacidade. Nesta seção analisa-se o potencial impacto desta situação, levando em consideração as máquinas que se encontram avariadas aquando da alocação do trabalhador, movimentando o trabalhador apenas para máquinas que não se encontrem paradas por avaria, com base na regra de alocação (*where rule*) implementada.

Para estes testes, selecionou-se a regra de alocação STPT, por ter sido a que demonstra ter os melhores resultados na globalidade dos cenários, em conjunto com a regra de despacho FIFO, nos três cenários físicos (Estágio único, Linha pura e Linha genérica com máquinas paralelas) e com os dois tipos de avarias. A Figura 38, compara os dois tipos de alocação, para as diferentes características de avarias, no cenário de Estágio único com máquinas paralelas, onde os valores representados pela legenda “S/Movimentação” revelam os cenários

onde a *when rule* não tem em conta a avaria das máquinas e na legenda “C/Movimentação” os valores onde já se consideram essas avarias.

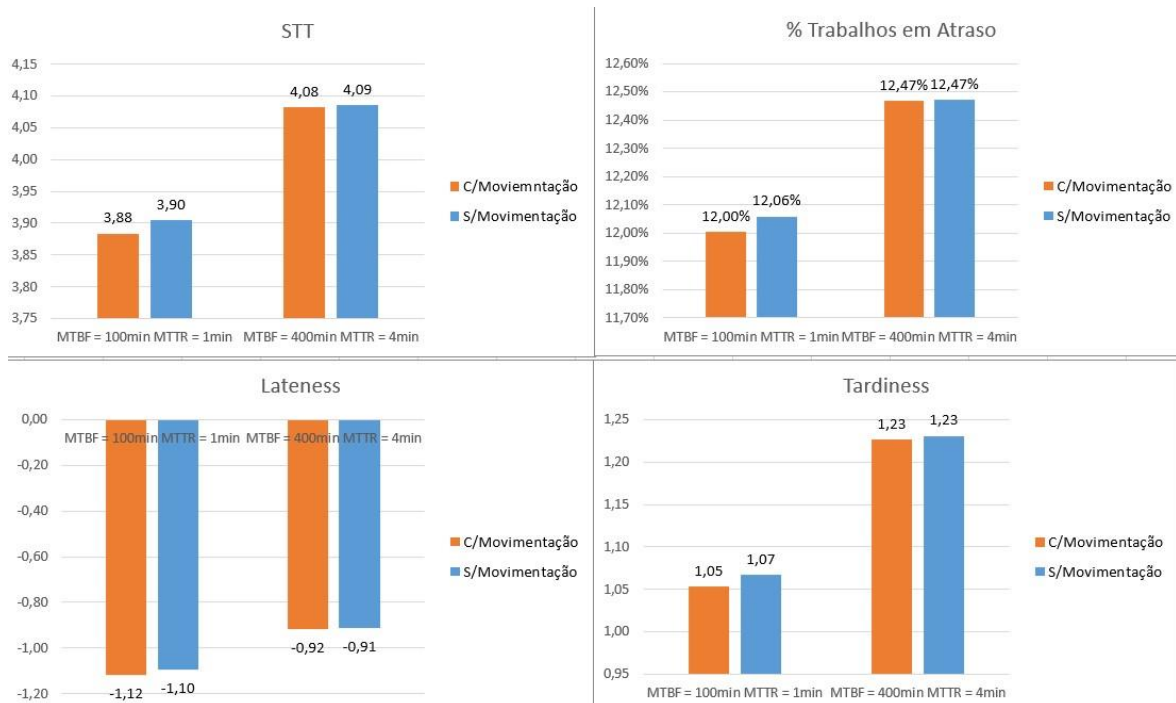


Figura 38 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, Estágio único com máquinas paralelas.

Como é possível observar, as diferenças nos resultados entre os dois tipos de ações por parte dos operários são muito ligeiras, para o sistema de Estágio único com máquinas paralelas. Apesar de existir uma pequena melhoria dos valores de desempenho, nos cenários onde os trabalhadores têm em conta as avarias, esta não é significativa.

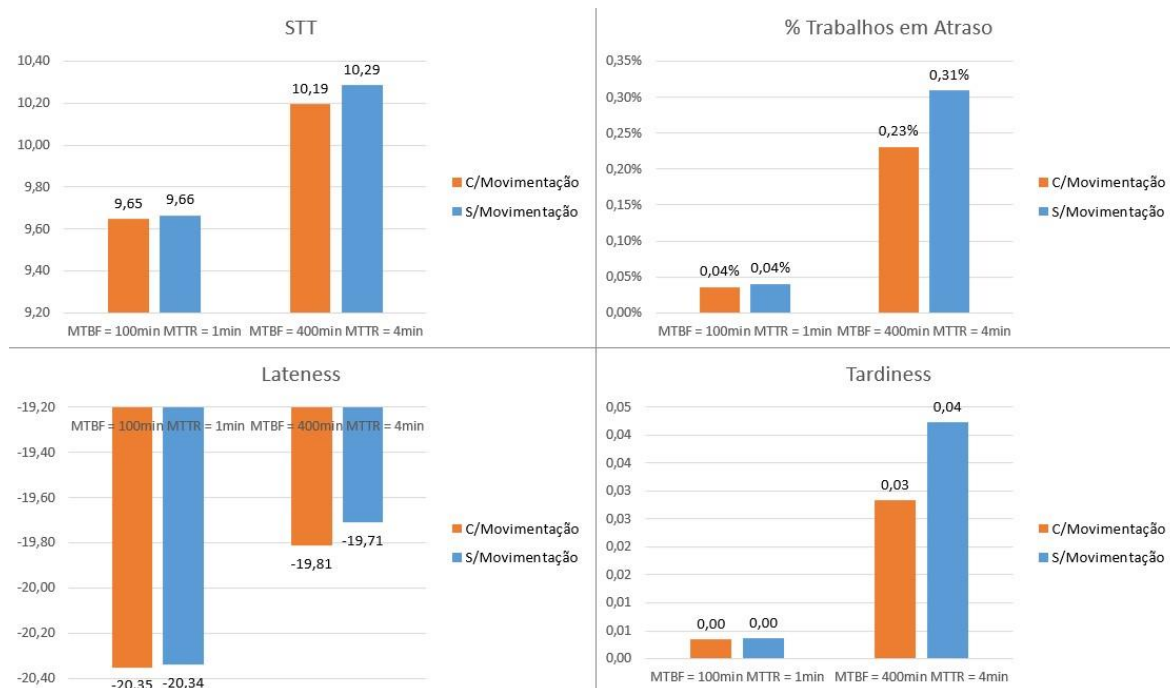


Figura 39 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, Linha pura com máquinas paralelas.

A Figura 39 mostra as mesmas comparações, mas desta vez para o cenário de Linha pura. Analisando os 4 gráficos, entende-se que as diferenças continuam a ser residuais. No entanto, percebe-se que ocorreu uma diminuição superior no que toca ao tempo médio dos trabalhos no sistema, na percentagem de trabalhos em atraso e no indicador *lateness*, para a ocorrência do segundo tipo de avarias (MTBF = EXPO (400 min), com MTTR = EXPO (4 min)).

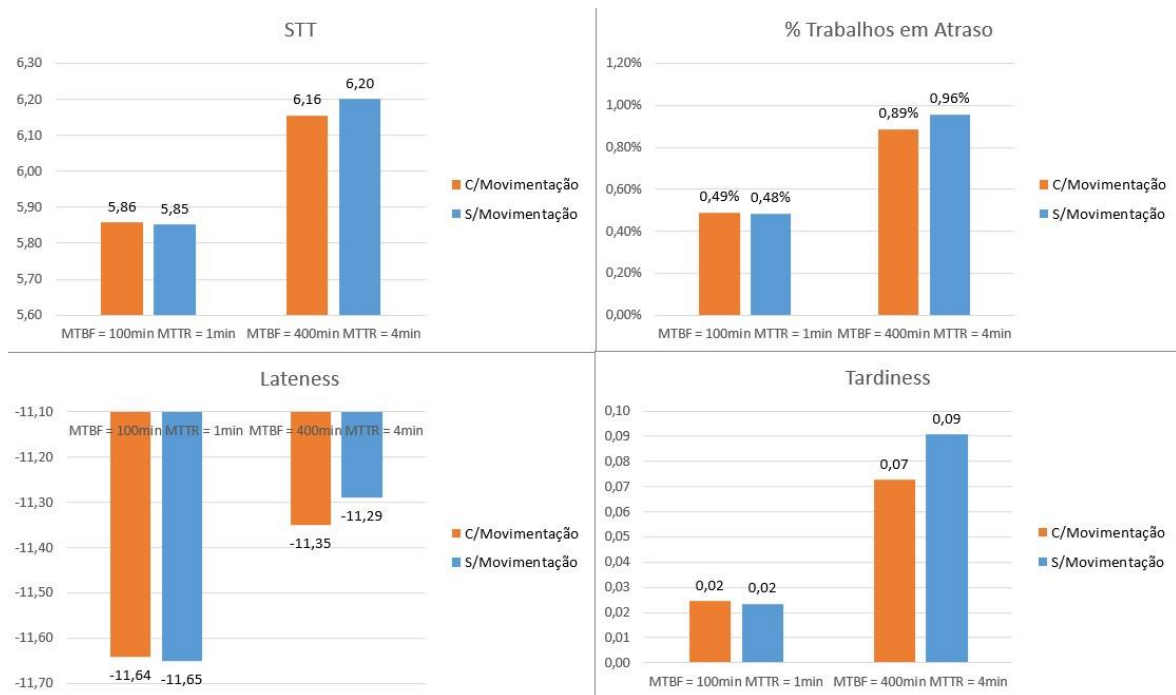


Figura 40 – Indicadores de desempenho; comparação de movimentações, *Linha genérica com máquinas paralelas*.

Por último expõem-se os gráficos para a Linha genérica, na Figura 40. Para este caso, verifica-se que com a alteração feita à forma de os trabalhadores encararem os momentos em que ocorrem avarias, aumentam ligeiramente os valores de STT, de trabalhos em atraso, *lateness* e *tardiness*, para o primeiro padrão de avarias definido, i.e., MTBF= EXPO (100 min) e MTTR= EXPO (1 min). Para o segundo padrão de avarias, i.e., MTBF= EXPO (400 min) e MTTR= EXPO (4 min), as alterações dos indicadores de desempenho continuam a ser residuais.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

5.1. CONCLUSÕES

Este projeto possibilitou o estudo de várias regras de alocação de trabalhadores a máquinas no contexto de sistemas de produção do tipo DRC. Isto foi feito com base na simulação discreta utilizando o *software* Arena. Através das simulações de vários cenários experimentais criados, procurou-se perceber a possível interação das regras de alocação dos trabalhadores, com as regras de despacho nas máquinas e com os níveis de disponibilidade destas dependentes da ocorrência de avarias.

Existiram algumas dificuldades na implementação destas políticas de controlo, nomeadamente, das regras responsáveis pela movimentação dos trabalhadores. Estas exigiram um estudo cuidadoso da linguagem de programação utilizada pelo Arena para poder corresponder à definição teórica das diversas normas. Também é importante referir que este trabalho assume o pressuposto de total disponibilidade dos trabalhadores nas suas deslocações entre máquinas (quando aplicadas as *where* e *when rules*), assumindo-se como negligenciável o tempo de movimentação do trabalhador entre máquinas e o tempo de movimentação do trabalho entre estágios produtivos.

Em relação aos resultados obtidos pode-se concluir o seguinte:

- Entre todos os fatores experimentais considerados, as regras responsáveis por alocar (movimentar) os trabalhadores (*Where rules*), são as que demonstram ter maior impacto nos resultados dos sistemas de produção estudados. A regra STPT (*Shortest Total Processing Time*) apresenta, de uma forma geral, os melhores resultados.

- As regras de despacho dos trabalhos, de uma forma geral, não mostraram ter um impacto significativo no desempenho do sistema. Em parte, estes resultados podem ser atribuídos à forma de modelação das datas devidas de entrega, em que uma constante é multiplicada pelo número de operações do trabalho. Isto faz com que, por exemplo a regra FISFS (*First-In-System-First-Served*) usada no despacho, opere de forma similar a FIFO. FISFS sequencia os trabalhos pela data de lançamento em produção, o que significa que um trabalho lançado mais cedo obtém prioridade em todas as filas de espera no espaço fabril, relativamente a trabalhos lançados mais tarde. FIFO não considera o momento de lançamento em produção, mas o momento de entrada na fila de espera.
- Os resultados obtidos quando a disponibilidade das máquinas é condicionada por avarias, mostram que níveis de indisponibilidade menores resultam em constrangimentos no sistema produtivo também menores, como seria de esperar. Relativamente ao desempenho relativo dos métodos de alocação (*where rules*) dos trabalhadores na presença de diferentes níveis de disponibilidade das máquinas, este não parece ser alterado, ou seja, mantém o comportamento observado nos cenários onde não ocorreram avarias.
- No que se refere à alocação dos trabalhadores levando em consideração as máquinas que se encontram paradas por avaria no momento da alocação, esta não parece influenciar de forma significativa o desempenho do sistema. O fato de não ter causado impacto no desempenho do sistema, poderá em certa medida ter a ver também com a forma de como as avarias foram modeladas – ou seja, pelo fato de que a avaria só ocorrer no final do processamento dos trabalhos e não durante e porque o nível de indisponibilidade das máquinas só foi testado a 1%. Isto limita o impacto da alocação realizada.

5.2. PROPOSTAS DE TRABALHO FUTURO

Sabendo que este trabalho tem algumas limitações e pode ser estendido em diversos domínios, deixam-se aqui algumas propostas de melhoria do mesmo:

- Testar as regras de controlo em novos cenários com características diferentes e baseados em cenários produtivos reais;

- Alargar o leque de regras do tipo *When e Where* a testar;
- Alargar o leque de regras de despacho a testar;
- Alargar o leque de fatores e níveis de experimentação a testar, incluindo por exemplo diferentes níveis de polivalência ou flexibilidade dos trabalhadores e de experiência dos mesmos;
- Testar o impacto que o lançamento controlado de trabalhos em produção, considerando, por exemplo, métodos como o CONWIP (*Constant Work In Process*), o POLCA (*Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*) ou o WLC.

Bibliografia

Akillioglu, H., Ferreira, J. D., Maffei, A., Neves, P., & Onori, M. (2014). *Continuous precise workload control method*. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 511-515. doi: 10.1109/ieem.2014.7058690.

Andrade-Pineda, J. L., Canca, D. & Gonzalez-R, P. L. (2019). *Scheduling a dual-resource flexible job shop with makespan and due date-related criteria*. Annals of Operations Research 291, pp. 5–35. doi: 10.1007/s10479-019-03196-0.

Araz, O. U., & Salum, L. (2010). *A multi-criteria adaptive control scheme based on neural networks and fuzzy inference for DRC manufacturing systems*. International Journal of Production Research, vol. 48, n. 1, pp. 251-270. doi: 10.1080/00207540802471256.

Bailey, C. D. (1989). *Forgetting and the Learning Curve: A Laboratory Study*. Management Science, vol. 35, n. 3, pp. 340-352. doi: 10.1287/mnsc.35.3.340.

Baker, K. R. & Bertrand, J.W.M. (1982). *A dynamic priority rule for scheduling against due-dates*. Journal of Operations Management, vol. 3, n. 1, pp. 37-42. doi: 10.1016/0272-6963(82)90020-1.

Bobrowski, P. M., & Park, P. S. (1993). *An evaluation of labor assignment rules when workers are not perfectly interchangeable*. Journal of Operations Management, 11(3), 257–268. doi:10.1016/0272-6963(93)90003-8.

Bokhorst, J. A. C., Slomp, J., & Gaalman, G. J. C. (2004). *On the who-rule in Dual Resource Constrained (DRC) manufacturing systems*. International Journal of Production Research, 42(23), pp. 5049–5074. doi: 10.1080/00207540410001733878.

Carlson, J. C. & Rowe, A. J. (1976). *How much does forgetting cost?* Industrial Engineering Vol. 8, pp. 40-47.

Costa, F., Portioli-Staudacher, A., Nisi, D. & Rossini, M. (2019). *Integration of Order Review and Release and Output Control with Worker's allocation in a pure flow shop*. International Federation of Automatic Control (IFAC), 52-13, pp. 2632-2637. doi: 0.1016/j.ifacol.2019.11.604.

Dias, J. (2005) - *Logística Global e Macrologística*. Lisboa: Edições Sílabo, Lda.

Fredendall, L. D. & Melnyk, S. A (1995). *Assessing the impact of reducing demand variance through improved planning on the performance of a dual resource constrained job shop*. International Journal of Production Research, vol. 33, n. 6, pp. 1521–1534. doi:10.1080/00207549508930226.

Kher, H. V. (2000). *Examination of flexibility acquisition policies in dual resource constrained job shops with simultaneous worker learning and forgetting effects*, University of Delaware, USA. Journal of the Operational Research Society, vol. 51, n. 5, pp. 592-601. doi: 10.1057/palgrave.jors.2600935.

Kher, H. V., Malhotra, M. K., Philipoom, P. R. & Fry, T. D. (1999). *Modelling Simultaneous worker learning and forgetting in dual resource constrained systems*. European Journal of Operational Research, 115: pp. 158-172.

Kher, H.V. & Fry, T.D. (2001). *Labour flexibility and assignment policies in a job shop having incommensurable objectives*. International Journal of Production Research, pp. 2295–2311. doi: 10.1080/00207540110036704.

Land, J., & Gaalman, G. (1995). *Workload Control Concepts in Job Shops: A Critical Assessment*, University of Groningen, Netherlands. Disponível em: <http://www.rug.nl/research/portal>.

Leilei, M., Chaoyong, Z., Biao, Z. & Yaping, R. (2019). *Mathematical Modeling and Optimization of Energy-Conscious Flexible Job Shop Scheduling Problem With Worker Flexibility*. IEEE Access, vol. 7, pp. 68043-68055. doi: 10.1109/access.2019.2916468.

Melnyk, S. A. & Ragatz, G. L. (1989). *Order review/release: research issues and perspectives*. International Journal of Production Research, vol. 27, n° 7, pp. 1081-1096. doi: 10.1080/00207548908942609.

Norman, B. A., Tharmmaphornphilas, W., Needy, K. L., Bidanda, B. & Warner, R. C. (2002). *Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills*. International Journal of Production Research, vol. 40, n° 6, pp. 1479–1492. doi: 10.1080/00207540110118082.

Paksi, A. B. N., & Ma'ruf, A. (2016). *Flexible Job-Shop Scheduling with Dual-Resource Constraints to Minimize Tardiness Using Genetic Algorithm*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering vol. 114, n° 1. doi: 10.1088/1757-899X/114/1/012060.

Portioli-Staudacher, A., Costa, F. & Thürer, M. (2019). *The Use of Labour Flexibility for Output Control in Workload Controlled Flow Shops: A Simulation Analysis*. International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 11, n° 3, pp. 429-442. doi: 10.5267/j.ijiec.2019.11.004.

Salum, L. & Araz, Ö. U. (2009). *Using the when/where rules in dual resource constrained systems for a hybrid push-pull control*. International Journal of Production Research, vol. 47, n. 6, pp. 1661–1677. doi: 10.1080/00207540701579530.

Tao, Z. & Liu, X. (2019). *Dynamic Scheduling of Dual-Resource Constrained Blocking Job Shop*. Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 447–456. doi: 10.1007/978-3-030-27529-7_38.

Thürer, M. (2018). *Dual Resource Constrained (DRC) Shops: Literature Review and Analysis*. In: Moon I., Lee G., Park J., Kiritsis D., von Cieminski G. (eds) *Advances in Production Management Systems. Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing*. APMS 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 535. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-99704-9_10.

Thürer, M., Stevenson, M. & Renna, P. (2019a). *Workload control in dual-resource constrained high variety shops: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, pp. 1–17. doi: 10.1080/00207543.2018.1497313.

Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M. J., & Fredendall, L. D. (2012). *Workload Control and Order Release: A Lean Solution for Make-to-Order Companies*. Production and Operations Management, vol. 21, n. 5, pp. 939–953. doi: 10.1111/j.1937-5956.2011.01307.x.

Thürer, M., Zhang, H., Stevenson, M., Costa, F. & Ma, L. (2019b). *Worker assignment in dual resource constrained assembly job shops with worker heterogeneity: an assessment by simulation*. International Journal of Production Research, pp. 1-14. doi: 10.1080/00207543.2019.1677963.

Wang, Y., Cen, H. J. & Yang, O. (2018). *Optimal Configuration For Workshop Manufacturing System Under Dual Resource Constraints*. International Journal of Simulation Modelling, pp. 180-189. doi: 102507/IJSIMM17(1)CO5.

Xie, J., Zhao, X., & Lee, T. (2003). *Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty*. International Journal of Production Economics, 83(1), pp. 65–84. doi: 10.1016/s0925-5273(02)00262-1.

Xu, J. (2013). *CERES: An Integrated Dual Resource Management and Production Planning System*. University of Auckland. PhD research.

Xu, J., Xu, X. & Xie, S.Q. (2011). *Recent developments in Dual Resource Constrained (DRC) system research*. European Journal of Operational Research, vol. 215, n. 2, pp. 309-318. doi: 10.1016/j.ejor.2011.03.004.

Yang, G., Do Chung, B. & Jin Lee, S. (2019). *Limited Search Space-Based Algorithm for Dual Resource Constrained Scheduling Problem with Multilevel Product Structure*. MDPI Applied Sciences, vol. 9, n. 19, 4005, pp. 1-15. doi: 10.3390/app9194005.

Yue, H., Slomp, J., Molleman, E. & Van Der Zee, D. J. (2008). *Worker flexibility in a parallel dual resource constrained job shop*. International Journal of Production Research vol. 46, n. 2, pp. 451-467. doi: 10.1080/00207540601138510.

Zheng, X., & Wang, L. (2016). *A knowledge-guided fruit fly optimization algorithm for dual resource constrained flexible job-shop scheduling problem*. International Journal of Production Research, 5554-5566. doi: 10.1080/00207543.2016.1170226.

Zhong, Q., Yang, H. & Tang, T. (2018). *Optimization Algorithm Simulation for Dual Resource Constrained Job Shop Scheduling*. International Journal of Simulation Modelling, pp. 147-158. doi: 10.2507/IJSIMM17(1)CO2.

Anexos

Esta seção contém todas as tabelas com os resultados obtidos através das simulações dos diversos cenários produtivos e que são mencionados no capítulo 4.

Tabela 8 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	90,09%	6,02±0,05	22,62%±0,17	1,02±0,05	2,43±0,04
<u>FIFO</u>	90,07%	4,21±0,04	13,34%±0,13	-0,79±0,04	1,28±0,03
<u>LTPT</u>	90,01%	4,57±0,05	15,42%±0,17	-0,43±0,05	1,45±0,04
<u>STPT</u>	90,08%	3,83±0,03	11,77%±0,11	-1,17±0,03	1,02±0,02

Tabela 9 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	90,07%	6,06±0,04	22,73%±0,15	1,06±0,04	2,47±0,04
<u>FIFO</u>	89,99%	4,20±0,03	13,31%±0,11	-0,81±0,03	1,27±0,03
<u>LTPT</u>	90,01%	4,57±0,05	15,42%±0,17	-0,43±0,05	1,45±0,04
<u>STPT</u>	90,08%	3,83±0,03	11,77%±0,11	-1,17±0,03	1,02±0,02

Tabela 10 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,99%	11,94±0,04	0,12%±0,01	-18,06±0,04	0,01±0,00
<u>FIFO</u>	90,12%	10,00±0,03	0,12%±0,01	-20,00±0,03	0,02±0,00
<u>LTPT</u>	89,92%	10,24±0,04	0,19%±0,03	-19,76±0,04	0,03±0,01
<u>STPT</u>	90,03%	9,41±0,02	0,01%±0,00	-20,59±0,02	0,001±0,00

Tabela 11 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	90,07%	11,98±0,04	0,21%±0,02	-18,03±0,04	0,02±0,00
<u>FIFO</u>	90,14%	10,02±0,03	0,17%±0,02	-19,98±0,03	0,02±0,00
<u>LTPT</u>	89,98%	10,34±0,04	0,25%±0,03	-19,67±0,04	0,03±0,00
<u>STPT</u>	90,24%	9,43±0,02	0,02%±0,01	-20,57±0,02	0,002±0,00

Tabela 12 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,49%	7,61±0,03	2,62%±0,04	-9,88±0,02	0,17±0,00
<u>FIFO</u>	90,94%	14,01±0,28	11,27%±0,28	-3,48±0,28	4,15±0,21
<u>LTPT</u>	91,02%	7,77±0,04	2,57%±0,06	-9,73±0,04	0,23±0,01
<u>STPT</u>	91,02%	5,70±0,01	0,58%±0,01	-11,80±0,01	0,03±0,00

Tabela 13 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,03%	7,58±0,03	1,88%±0,03	-9,93±0,03	0,11±0,00
<u>FIFO</u>	90,94%	14,01±0,23	10,86%±0,23	-3,50±0,23	4,17±0,17
<u>LTPT</u>	91,27%	7,89±0,04	2,31%±0,06	-9,61±0,04	0,22±0,01
<u>STPT</u>	91,18%	5,71±0,01	0,39%±0,01	-11,78±0,01	0,02±0,00

Tabela 14 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,77%	6,18±0,04	23,15%±0,15	1,18±0,04	2,56±0,04
<u>FIFO</u>	90,00%	4,29±0,04	13,62%±0,11	-0,71±0,04	1,34±0,03
<u>LTPT</u>	89,84%	4,66±0,05	15,85%±0,18	-0,34±0,05	1,50±0,04
<u>STPT</u>	90,28%	3,91±0,03	12,06%±0,10	-1,10±0,03	1,07±0,02

Tabela 15 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,77%	6,18±0,04	23,15%±0,15	1,18±0,04	2,56±0,04
<u>FIFO</u>	90,00%	4,29±0,04	13,62%±0,11	-0,71±0,04	1,34±0,03
<u>LTPT</u>	89,84%	4,66±0,05	15,85%±0,18	-0,34±0,05	1,50±0,04
<u>STPT</u>	90,28%	3,91±0,03	12,06%±0,10	-1,10±0,03	1,07±0,02

Tabela 16 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	90,20%	12,47±0,05	0,17%±0,02	-17,53±0,05	0,01±0,00
<u>FIFO</u>	90,07%	10,35±0,03	0,20%±0,02	-19,65±0,03	0,02±0,00
<u>LTPT</u>	90,20%	10,73±0,05	0,30%±0,03	-19,27±0,05	0,04±0,01
<u>STPT</u>	90,14%	9,66±0,02	0,02%±0,01	-20,35±0,02	0,002±0,00

Tabela 17 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,71%	12,44±0,04	0,30%±0,02	-17,56±0,04	0,02±0,00
<u>FIFO</u>	89,90%	10,32±0,03	0,24%±0,02	-19,68±0,03	0,03±0,00
<u>LTPT</u>	89,92%	10,71±0,05	0,35%±0,04	-19,29±0,05	0,05±0,01
<u>STPT</u>	90,02%	9,67±0,02	0,04%±0,01	-20,34±0,02	0,004±0,00

Tabela 18 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,42%	7,92±0,02	2,99%±0,04	-9,59±0,02	0,20±0,00
<u>FIFO</u>	91,20%	14,69±0,24	12,20%±0,23	-2,83±0,24	4,42±0,20
<u>LTPT</u>	91,04%	8,10±0,04	3,02%±0,07	-9,41±0,04	0,29±0,01
<u>STPT</u>	91,06%	5,85±0,01	0,69%±0,01	-11,65±0,01	0,03±0,00

Tabela 19 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,35%	7,90±0,03	2,29%±0,04	-9,6±0,03	0,15±0,00
<u>FIFO</u>	91,01%	14,75±0,26	11,78%±0,26	-2,76±0,26	4,51±0,21
<u>LTPT</u>	90,98%	8,21±0,05	2,73%±0,08	-9,29±0,05	0,29±0,02
<u>STPT</u>	91,00%	5,85±0,01	0,48%±0,02	-11,65±0,01	0,02±0,00

Tabela 20 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,81%	6,40±0,05	23,77%±0,17	1,40±0,05	2,76±0,05
<u>FIFO</u>	88,93%	4,52±0,05	14,14%±0,14	-0,48±0,05	1,54±0,04
<u>LTPT</u>	90,07%	4,87±0,06	16,40%±0,17	-0,13±0,06	1,68±0,05
<u>STPT</u>	89,92%	4,09±0,03	12,47%±0,10	-0,91±0,03	1,23±0,03

Tabela 21 – Indicadores de desempenho: Estágio único com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,81%	6,40±0,05	23,77%±0,17	1,40±0,05	2,76±0,05
<u>FIFO</u>	89,93%	4,52±0,05	14,14%±0,14	-0,48±0,05	1,54±0,04
<u>LTPT</u>	90,07%	4,87±0,06	16,40%±0,17	-0,13±0,06	1,68±0,05
<u>STPT</u>	89,92%	4,09±0,03	12,47%±0,10	-0,91±0,03	1,23±0,03

Tabela 22 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,96%	13,75±0,07	0,88%±0,06	-16,25±0,07	0,08±0,01
<u>FIFO</u>	89,89%	11,38±0,06	0,86%±0,05	-18,62±0,06	0,16±0,02
<u>LTPT</u>	90,01%	12,27±0,12	1,33%±0,11	-17,73±0,12	0,27±0,04
<u>STPT</u>	90,23%	10,29±0,04	0,26%±0,03	-19,71±0,04	0,04±0,01

Tabela 23 – Indicadores de desempenho: Linha pura com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	89,57%	13,75±0,07	1,15%±0,07	-16,25±0,07	0,13±0,02
<u>FIFO</u>	89,97%	11,39±0,07	0,94%±0,06	-18,61±0,07	0,19±0,02
<u>LTPT</u>	90,11%	12,30±0,11	1,41%±0,10	-17,70±0,11	0,29±0,05
<u>STPT</u>	90,06%	10,29±0,03	0,31%±0,02	-19,71±0,03	0,04 ±0,01

Tabela 24 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FISFS.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,58%	8,64±0,05	4,20%±0,06	-8,87±0,04	0,37±0,01
<u>FIFO</u>	91,07%	15,51±0,29	13,54%±0,29	-1,99±0,29	4,80±0,22
<u>LTPT</u>	91,12%	9,13±0,08	4,66%±0,13	-8,37±0,08	0,65±0,04
<u>STPT</u>	91,18%	6,19±0,02	1,15%±0,03	-11,31±0,02	0,10±0,01

Tabela 25 – Indicadores de desempenho: Linha genérica com máquinas paralelas, FIFO.

Regras de alocação	<i>Utilização média (%)</i>	<i>Shop Throughput Time (unidades de tempo)</i>	Trabalhos em Atraso (%)	<i>Lateness (unidades de tempo)</i>	<i>Tardiness (unidades de tempo)</i>
<u>LNQ</u>	91,59%	8,61±0,05	3,46%±0,08	-8,89±0,05	0,30±0,01
<u>FIFO</u>	91,06%	15,29±0,22	12,86%±0,24	-2,22±0,22	4,63±0,17
<u>LTPT</u>	90,96%	9,20±0,07	4,30%±0,11	-8,30±0,07	0,63±0,03
<u>STPT</u>	90,97%	6,20±0,02	0,96%±0,03	-11,29±0,02	0,09±0,01