



Universidade do Minho  
Departamento Produção e Sistemas

DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO E SISTEMAS  
Mestrado em Engenharia de Sistemas  
*Projeto Integrado I*

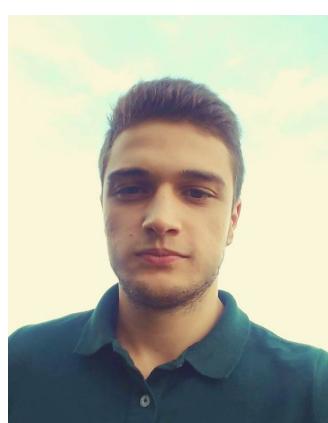
## ***PROJETO INTEGRADO DE GESTÃO DA PRODUÇÃO-SIMULAÇÃO***



Célia Figueiredo  
A67637



Margarida Rolim  
PG38332



Daniel Sousa  
PG37112



Márcia Costa  
A67672

Coordenador: Luís Dias  
Docentes da UC: Leonilde Varela, Nuno Fernandes  
Outros colaboradores da UC: S. Carmo-Silva, Guilherme Pereira

Universidade do Minho, 15 de Abril de 2019

## **Resumo**

No âmbito da unidade curricular de Projeto Integrado I do Mestrado em Engenharia de Sistemas, da Universidade do Minho, realizou-se o presente trabalho, com o auxílio do *software* de simulação *SIMIO®e* através da utilização de mecanismos de Controlo da Atividade de Produção (CAP), de modo a avaliar o desempenho de um sistema de produção dependente de dois mecanismos diferentes, colocando-os em confronto, a fim de determinar qual permite obter melhor desempenho produtivo. O *software* em causa, é projetado para suportar o paradigma da modelação de objetos, incluindo a orientação a processos e eventos.

Baseado na modelação, criou-se uma representação de um sistema de produção formado por seis estações de trabalho, cada uma com uma máquina, e um número fixo de trabalhadores. Foi necessário, considerar, para além do mecanismo de CAP e das regras de despacho dos trabalhos nas máquinas, aspetos relacionados com a alocação do trabalhador, nomeadamente para onde o transferir e quando o fazer. A definição do sistema em estudo exigiu, também, que fossem estabelecidas as necessidades de produção, os tempos de operação e as datas de entrega dos trabalhos.

Após a modelação, foram efetuadas várias análises relacionadas com as medidas de desempenho estabelecidas, de forma a obter-se uma otimização dos resultados face aos mecanismos em causa. Posto isto, o presente relatório serve para documentar, passo a passo, todas as decisões tomadas, a fim de estudar os problemas propostos no projeto.

Os resultados obtidos, demonstram que o mecanismo Generic Kanban System (GKS), com movimentação do operador *standard*, com 3 trabalhadores na linha de produção, apresentou melhores resultados quando comparado com o mecanismo Workload Control (WLC). Em seguimento, relativamente ao modelo acima referido, apenas diferindo no número de trabalhadores na linha de produção, sendo estes 5, o WLC apresentou resultados mais satisfatórios.

Por fim, em todos os cenários testados, nos quais a movimentação do operário é confinada desde a máquina um até ao final da linha de produção, o mecanismo WLC apresentou resultados significativamente superiores ao mecanismo GKS.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contextualização Teórica</b>	<b>2</b>
2.1	Mecanismo Workload Control . . . . .	2
2.1.1	Funcionamento do WLC . . . . .	2
2.2	Mecanismo Generic Kanban System . . . . .	4
2.2.1	Funcionamento do GKS . . . . .	5
2.3	Ordenação das Encomendas . . . . .	5
2.4	Regras de Despacho . . . . .	5
2.4.1	<i>First In System First Served</i> . . . . .	5
2.4.2	<i>Modified Operation Due Date</i> . . . . .	6
2.5	Medidas de Desempenho . . . . .	6
2.5.1	<i>Shop Throughput Time</i> . . . . .	6
2.5.2	<i>Total Throughput Time</i> . . . . .	6
2.5.3	<i>Lateness</i> . . . . .	6
2.5.4	<i>Tardiness</i> . . . . .	6
2.5.5	<i>Percent Tardy</i> . . . . .	6
2.6	Revisão da Literatura . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Descrição do sistema de produção</b>	<b>8</b>
3.1	Implementação do modelo de simulação . . . . .	8
3.1.1	Gerar Encomendas . . . . .	8
3.1.2	Ordenação na <i>pool</i> . . . . .	9
3.1.3	Teste . . . . .	9
3.1.4	Regra de despacho - FSFS . . . . .	10
3.1.5	Regra de despacho - MODD . . . . .	10
3.1.6	Workers - Standard . . . . .	11
3.1.7	Workers - Acompanhamento do trabalho até ao fim da linha de produção . . . . .	11
3.1.8	Medidas de Desempenho . . . . .	11
3.2	Implementação do Workload Control . . . . .	12
3.3	Implementação do Generic Kanban System . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Análise de resultados</b>	<b>15</b>
4.1	Testes Inicias . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Análise de resultados modelo WLC</b>	<b>16</b>
5.1	Modelo WLC com movimentação <i>Standard</i> e regra de despacho <i>FSFS</i> . . . . .	16
5.1.1	Três Trabalhadores . . . . .	16
5.1.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	17
5.2	Modelo WLC com acompanhamento até ao Fim de Linha e regra de despacho <i>First In System First Served (FSFS)</i> . . . . .	17
5.2.1	Três Trabalhadores . . . . .	17
5.2.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	18
5.3	Modelo WLC com movimentação <i>Standard</i> e regra de despacho <i>MODD</i> . . . . .	19
5.3.1	Três Trabalhadores . . . . .	19

5.3.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	19
5.4	Modelo WLC com movimentação Acompanhamento até ao Fim de Linha (AFL) e regra de despacho MODD . . . . .	20
5.4.1	Três Trabalhadores . . . . .	20
5.4.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Análise de resultados modelo GKS</b>	<b>22</b>
6.1	Modelo GKS com movimentação <i>Standard</i> e regra de despacho FSFS . . . . .	22
6.1.1	Três Trabalhadores . . . . .	22
6.1.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	22
6.2	Modelo GKS com movimentação AFL e regra de despacho FSFS . . . . .	23
6.2.1	Três Trabalhadores . . . . .	23
6.2.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	24
6.3	Modelo GKS com movimentação <i>Standard</i> e regra de despacho MODD . . . . .	24
6.3.1	Três Trabalhadores . . . . .	24
6.3.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	25
6.4	Modelo GKS com movimentação AFL e regra de despacho MODD . . . . .	26
6.4.1	Três Trabalhadores . . . . .	26
6.4.2	Cinco Trabalhadores . . . . .	26
<b>7</b>	<b>Comparação dos modelos WLC vs GKS</b>	<b>27</b>
7.1	Regra de despacho FSFS e Movimentação do trabalhador <i>Standard</i> - 3 trabalhadores . . . . .	27
7.2	Regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> - 5 trabalhadores . . . . .	28
7.3	Regra de despacho Modified Operation Due Date (MODD) e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> - 3 trabalhadores . . . . .	28
7.4	Regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> - 5 trabalhadores . . . . .	29
7.5	Regra de despacho MODD e Movimentação do trabalhador Acompanhamento Fim de linha - 3 trabalhadores . . . . .	30
<b>8</b>	<b>Regras de movimentação: <i>Standard</i> vs AFL</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Conclusões e trabalho futuro</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>35</b>
A.1	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador <i>standard</i> . . . . .	35
A.2	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador AFL . . . . .	36
A.3	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra MODD e movimentação do trabalhador <i>standard</i> . . . . .	37
A.4	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra MODD e movimentação do trabalhador AFL . . . . .	38
A.5	Resultados dos possíveis melhores cenários de todos os modelos com os mecanismos WLC e GKS . . . . .	38
A.6	Resultados com a comparação das movimentações do trabalhador <i>standard</i> e AFL . . . . .	39
A.7	Resultados com a comparação das regras de despacho FSFS e MODD . . . . .	39

# Listas de Figuras

2.1	Modo de operação de mecanismos baseados no WLC . . . . .	3
2.2	Modo de operação de mecanismos baseados no GKS . . . . .	5
3.1	Modelo Geral do Sistema de Produção <i>SIMIO</i> . . . . .	8
3.2	Processo para atribuir tempos de trabalho e datas de entrega a cada trabalho . . . . .	9
3.3	Processo para disparar o evento <i>CriarRevisor</i> . . . . .	9
3.4	Teste que verifica se o trabalho pode ser lançado para o espaço fabril . . . . .	9
3.5	Processo de atribuição do MODD e ODD a cada entidade . . . . .	10
3.6	Processo que garante a movimentação do trabalhador que acompanha os trabalhos até ao fim da linha de produção . . . . .	11
3.7	Processo que regista o tempo de lançamento do trabalho no sistema de produção . . . . .	12
3.8	Processo que regista o tempo de lançamento do trabalho no sistema de produção . . . . .	12
3.9	Processo que verifica se um trabalho pode ser lançado de acordo com o mecanismo CAP WLC . . . . .	13
3.10	Processo que atualiza a carga de trabalho de cada máquina após o lançamento de um novo trabalho . . . . .	13
3.11	Processo que atualiza a carga de trabalho de cada máquina após o processamento do trabalho . . . . .	13
3.12	Processo que verifica se um trabalho pode ser lançado, com o mecanismo CAP, GKS . . . . .	14
3.13	Processo que incrementa uma unidade em todas as variáveis <i>Kanban</i> . . . . .	14
3.14	Processo que decrementa uma unidade na variável <i>Kanban</i> , correspondente à máquina que terminou o processamento do trabalho . . . . .	14
4.1	Gráfico Testes Iniciais . . . . .	15
5.1	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o Percent Tardy (PTardy), o b) avalia o Total Throughput Time (TTT), o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	16
5.2	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	17
5.3	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	18
5.4	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	18
5.5	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	19
5.6	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	20
5.7	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness . . . . .	20

5.8	Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	21
6.1	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador <i>Standard</i> e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	22
6.2	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador <i>Standard</i> e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	23
6.3	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador <i>Standard</i> e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	23
6.4	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	24
6.5	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador <i>Standard</i> e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	25
6.6	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador <i>Standard</i> e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	25
6.7	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	26
6.8	Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	26
7.1	Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> . O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	27
7.2	Comparação dos modelos WLC e GKS de 5 trabalhadores segundo a regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> . O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	28
7.3	Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> . O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	28
7.4	Comparação dos modelos WLC e GKS de 5 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador <i>Standard</i> . O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	29
7.5	Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador Acompanhamento Fim de linha. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o <i>Tardiness</i> e o d) avalia o <i>Lateness</i> . . . . .	30
8.1	Comparação das regras de movimentação para conclusão dos trabalhos e para distância percorrida. O gráfico a) avalia a conclusão dos trabalhos e o gráfico b) avalia a distância percorrida pelo trabalhador	31
8.2	Comparação das regras de movimentação para percentagem de trabalhos em atraso e para medidas de desempenho. O gráfico a) avalia o PTardy e o gráfico b) avalia várias medidas de desempenho, TTT, Shop Throughput Time (STT), <i>Tardiness</i> e <i>Lateness</i> . . . . .	32
8.3	Comparação das regras de despacho para atraso dos trabalhos, medidas de desempenho e para conclusão dos trabalhos. O gráfico a) avalia o atraso na conclusão dos trabalhos, o gráfico b) avalia o PTardy, o TTT e o STT e o gráfico c) avalia a conclusão dos trabalhos . . . . .	32

# Listas de Tabelas

4.1	Valores do teste inicial . . . . .	15
A.1	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador <i>standard</i> . . . . .	35
A.2	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador AFL . . . . .	36
A.3	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra MODD e movimentação do trabalhador <i>standard</i> . . . . .	37
A.4	Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra MODD e movimentação do trabalhador AFL . . . . .	38
A.5	Resultados dos possíveis melhores cenários de todos os modelos com os mecanismos WLC e GKS . . . . .	38
A.6	Resultados com a comparação das movimentações do trabalhador <i>standard</i> e AFL . . . . .	39
A.7	Resultados com a comparação das regras de despacho FSFS e MODD . . . . .	39

# Listas de siglas

**AFL** Acompanhamento até ao Fim de Linha

**CAP** Controlo da Atividade de Produção

**CT** Centro de Trabalho

**DRC** *Dual Resource Constrained*

**EDD** *Earliest Due Date*

**EF** Espaço Fabril

**FIFO** *First In First Out*

**FSFS** *First In System First Served*

**GKS** *Generic Kanban System*

**JIT** *Just In Time*

**LPT** *Longest Processing Time*

**LOOR** *Load Oriented Order Release*

**MCAg** Método da carga agregada

**MCAj** Método da carga ajustada

**MTO** *Make To Order*

**MODD** *Modified Operation Due Date*

**ODD** *Operation Due Date*

**PCP** Planeamento e Controlo da Produção

**PTardy** *Percent Tardy*

**STT** *Shop Throughput Time*

**TTT** *Total Throughput Time*

**TKS** *Toyota's Kanban System*

**WLC** *Workload Control*

**WIP** *Work in Process*

# 1. Introdução

Gerir, é o processo de determinar objetivos, planear, implementar e controlar os processos de produção a fim de os alcançar.

A gestão é determinada pela organização de uma empresa e desenvolve-se no sentido de atingir os objetivos da mesma.

A Gestão da produção é considerada a ciência associada à conceção e operação de sistemas de produção. Identifica-se gestão da produção, como uma função que integra tanto Planeamento como Controlo da Produção. Realça-se que, o planeamento e controlo da produção é determinante para avaliar o desempenho de um sistema produtivo. Carmo-Silva (2015)

O CAP é uma função da Gestão da Produção determinante no sucesso de uma empresa. O sucesso desta atividade de controlo depende do sistema produtivo implementado e dos mecanismos de controlo utilizados. Mortágua (2014)

Simulação pode definir-se como uma sequência de experiências baseadas num modelo que representa a realidade. Permite trabalhar em condições semelhantes às reais, mas considerando variáveis controladas, num ambiente que se assemelha ao mundo real, embora criado ou acondicionado artificialmente. É útil para criar um sistema ou processo simulado, através do qual se podem deduzir várias inferências, elaborar relatórios e construir modelos cada vez mais próximos da realidade.

O objetivo geral do projeto é recorrer a modelos de simulação por computador de forma a estabelecer o modo operatório e avaliar o desempenho de um sistema de produção, dependente dos mecanismos WLC e GKS de controlo da atividade produtiva, colocando-os em confronto e, dessa forma, tornar possível identificar qual o que apresenta melhor desempenho produtivo. De forma a assegurar que os resultados obtidos alicerçam-se em veracidade estatística, é elaborado um procedimento de experimentação complexo, que suporta toda a análise elaborada. O sistema de produção em estudo, consiste num sistema Dual Resource Constrained (DRC), no qual existem dois tipos de recursos que determinam o nível de *output* (i.e., a produção) do sistema, sendo estes as máquinas e os trabalhadores.

## 2. Contextualização Teórica

### 2.1 Mecanismo Workload Control

Uma abordagem ao CAP, especificamente desenvolvida para a produção por encomenda, é o WLC (Stevenson\* et al. (2005)). Esta, tem como objetivo manter sob controlo a carga no espaço fabril. Se a carga se mantiver reduzida e estável, é possível obter tempos de percurso controlados isto é, tempos em que os artigos se mantêm em curso de fabrico, desde o seu lançamento no espaço fabril até à sua completa fabricação e, portanto, oferecer datas de entrega competitivas e fiáveis.

Este mecanismo surgiu no seguimento do denominado de *Input/Output Control*, desenvolvido para se adequar a ambientes de produção de complexidade alta, como *job shops*, e empresas com ambiente de satisfação da procura Make To Order (MTO). O *Input/Output Control* lança trabalhos para produção consoante os trabalhos anteriormente já lançados, são finalizados, de forma a manter a carga do sistema e os *lead times* controlados. O objetivo do WLC é reduzir o tempo em curso de fabrico dos trabalhos, com vista a cumprir as datas de entrega acordadas das encomendas negociadas Fernandes and Carmo-Silva (2011).

A estratégia usada para atingir este objetivo, é encontrar o tamanho ideal das filas de espera no Espaço Fabril (EF) e controlá-lo, com o intuito de regular o tempo em que os trabalhos permanecem em curso de fabrico, após se assegurar que a capacidade produtiva do sistema, satisfaz a procura do mesmo. Para tal, o WLC controla o lançamento dos trabalhos no EF, de forma a garantir que o trabalho, o *input* da operação, que é lançado para produção não ultrapassa a capacidade, o *output* da operação, a fim de executar os trabalhos a tempo, assegurando-se também, de que à medida que os trabalhos são concluídos, novos trabalhos são lançados no sistema. Este processo garante, desta forma, que as taxas de entrada são iguais às taxas de saída. Se a taxa de entrada for superior à taxa de saída, podem ocorrer congestionamentos e atrasos nas datas de entrega. Caso contrário, o sistema fica subaproveitado.

Por norma, este mecanismo está associado à produção por encomenda (MTO), ao invés de ser produção para stock.

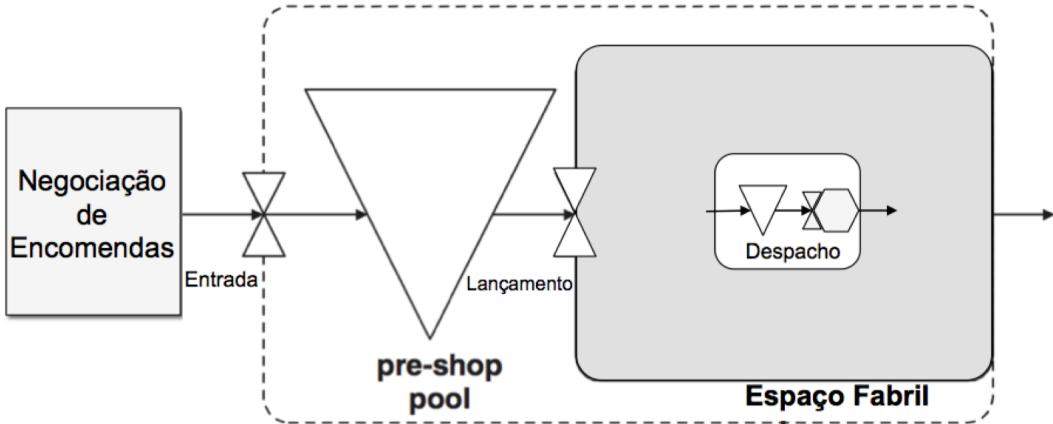
Genericamente, numa produção por encomenda, a fábrica apenas inicia os trabalhos após receber o pedido por parte do cliente. No contexto do problema, o conceito de *input-output control* baseia-se numa técnica de controlo da capacidade, na qual as entradas e saídas são monitorizadas, ou seja, são desenvolvidas pelo planeamento, conforme os requisitos de capacidade estabelecidos e, posteriormente, aprovados pelo responsável da produção. De forma genérica, as entradas reais são comparadas com as planeadas, de forma a identificar as saídas de cada centro de trabalho. De forma a averiguar eventuais problemas nos próprios centros de trabalho, são efetuadas comparações entre as saídas reais e as planeadas. Assim, é possível manter os *lead times* controlados. Na eventualidade de ocorrer algum tipo de falhas neste controlo, a capacidade produtiva do sistema de produção pode ser posta em causa e, desta forma, condicionar os prazos de entrega das encomendas.

Afirma-se que o principal objetivo do WLC, é controlar as filas de espera no espaço fabril, respeitando as datas de entrega estabelecidas. Esse controlo é conseguido através da análise de tempos, desde que a ordem de produção é anunciada até ao momento em que o produto fica disponível, para o cliente. Também faz parte desse mesmo controlo, a análise referente às datas de entrada e saída dos pedidos.

#### 2.1.1 Funcionamento do WLC

As decisões de Planeamento e Controlo da Produção (PCP), no âmbito do WLC, estendem-se principalmente às fases de chegada de trabalhos ao sistema produtivo, de lançamento dos trabalhos em produção no espaço fabril e, de despacho. Por vezes, também é considerada a fase de negociação das encomendas com o cliente. O WLC apresenta uma estrutura hierárquica de cargas de trabalho dividida em três fases, nas quais se pode efetuar o controlo das filas de espera. A figura 2.1 apresenta o modo de operação de mecanismos baseados na abordagem WLC.

Na fase de entrada de trabalhos, após a aceitação das encomendas, estas seguem para uma *pre-shop pool* onde



**Figura 2.1:** Modo de operação de mecanismos baseados no WLC

aguardam o lançamento. No momento anterior ao momento em que as encomendas seguem para a produção, é necessário criar ordens de fabrico, planejar o processo produtivo, adquirir materiais, entre outros. Nesta fase, a data de entrega da encomenda já é conhecida, pois resultou da fase de negociação. Porém, no caso em que o cliente demora demasiado tempo a responder à proposta da empresa e, caso tenham sido aceites outras encomendas entretanto, não sendo possível assegurar a entrega na data previamente proposta, a empresa, poderá ter que recusar a encomenda ou propor uma nova data de entrega, sendo que esta poderá ou não ser aceite pelo cliente.

As datas de entrega devem de ser compatíveis com a capacidade disponível pelo que, juntamente com as gamas operatórias dos trabalhos e os tempos de processamento em cada Centro de Trabalho (CT), permitem determinar o ajuste necessário de capacidade, que é uma ação do controlo de saídas – *output control*.

Na fase de lançamento, o CAP é responsável por lançar os trabalhos para o espaço fabril. Para tal, são definidas normas ou limites de carga para cada CT. No momento do lançamento, a carga em cada CT, resultante do lançamento do trabalho, é comparada com as normas de carga. O trabalho só é lançado caso não exceda as normas de carga dos centros de trabalho. Caso contrário, é mantido na *pool* até ao próximo momento de lançamento, o qual será, na altura, novamente avaliado. Formas alternativas de lançamento, autorizam o lançamento do trabalho mesmo excedendo as normas de carga, com o objetivo de alimentar centros de trabalho que se encontram parados, por falta de alimentação (e.g., Thurer et al. 2012) ou, por outro lado, com o propósito de encontrar um equilíbrio mais uniforme, a nível de distribuição de carga pelos centros de trabalho Fernandes and Carmo-Silva (2011). Por fim, na fase de despacho, o CAP tem a função de selecionar dos trabalhos que estão na fila de espera para serem processados, aqueles que devem ter prioridade relativamente aos restantes, consoante a disponibilidade das máquinas. A prioridade pode ser determinada de acordo com regras de despacho muito simples, tais como a regra First In First Out (FIFO) ou de acordo com regras mais elaboradas, orientadas para as datas de entrega.

Desta forma e de acordo que vários autores, o WLC pode ser definido como o controlo das filas de espera no espaço fabril, uma vez que, se as filas de espera permanecerem parcialmente reduzidas e sob o controlo de quem as analisa, isso encadeará tempos de espera e tempos de percurso mais controlados.

### 2.1.1.1 Métodos de contabilização da carga no WLC

Uma dimensão utilizada por Bergamaschi (1997) é a contabilização da carga. Esta remete para a forma como a carga presente no sistema é contabilizada, que pode ser obtida através do número de trabalhos ou na quantidade de trabalho feito, podendo este ser medido em minutos, horas, dias, entre outros. A contabilização de carga é habitualmente utilizada em mecanismos de limitação de carga.

Uma vez que o WLC procura manter a carga nos centros de trabalho baixa e sob controlo, importa medir a carga de cada trabalho e o que esta acresce à carga de cada um dos centros de trabalho, no momento do lançamento. Para tal, é necessário conhecer não só a carga resultante dos trabalhos em fila de espera e em processamento no CT, também conhecida como carga direta, mas também a carga resultante dos trabalhos que estão a montante e que irão chegar ao CT num futuro próximo, denominada de carga indireta. Isto deve ser tido em conta, uma vez que nem todos os trabalhos que chegam a um CT vêm diretamente da *pool*. A carga indireta de um CT corresponde, portanto, à carga dos trabalhos já lançados que estão a chegar a um CT. Em acréscimo, a carga direta pode ser

medida, enquanto que a indireta tem de ser estimada. O processo como esta é estimada varia de acordo com método de contabilização utilizado.

#### **2.1.1.1.1 Método da carga agregada**

Um dos métodos para contabilizar, em cada momento, a carga de trabalho de um CT, é conhecida por Método da carga agregada (MCAg), tendo sido introduzido por Bertrand (1981). Este agrupa a carga indireta com a carga direta do CT. Isto implicar que, no momento em que um trabalho é lançado para o EF, a carga do CT é atualizada, adicionando a carga do trabalho, mesmo que o CT não seja o primeiro da rota de fabrico deste.

#### **2.1.1.1.2 Método da carga ajustada ou carga corrigida**

Oosterman (2000) propuseram um outro método conhecido por Método da carga ajustada (MCAj). Na versão simplificada deste método, a contribuição da carga do trabalho para a carga de qualquer CT, não é igual ao tempo de processamento da operação neste, tal como acontece na abordagem anterior. Assim, esta é obtida através do quociente da carga operatória do trabalho, pela posição do CT no roteiro de fabrico do mesmo. A título de exemplo, um trabalho que tenha a segunda operação com tempo de processamento de 10 horas, a sua execução num CT contabiliza, para este centro com  $10/2$  horas, isto é 5 horas. Caso a operação fosse a quarta na sequência de fabrico, esta seria apenas de  $10/4$  horas, sendo 2,5 horas (Mortágua (2014)).

No instante em que um trabalho conclui o seu processamento no CT, tanto no MCAg como no MCAj, a carga deixa de ser contabilizada.

#### **2.1.1.2 Métodos de controlo da carga no Workload Control**

Para o controlo da carga no espaço fabril, são geralmente definidas normas ou limites de carga para cada centro de trabalho. Estas, podem ser estabelecidas para limitar superiormente e/ou inferiormente a carga num CT. Em relação ao limite superior, o trabalho é apenas lançado caso a carga resultante não ultrapasse esse limite. O Load Oriented Order Release (LOOR) usa esta estratégia de limite à carga no percurso de produção. Relativamente ao limite inferior, o trabalho é lançado sempre que a carga se encontre abaixo desse mesmo. O método WLC engloba estas duas estratégias, procurando manter o nível da carga entre os valores mínimo e máximo estipulados.

Frequentemente, a imposição de normas ou limites rígidos à carga, que pode ser lançada para o espaço fabril, resulta num efeito conhecido por *premature idleness* (Land (1998)). Este, por vezes, resulta na possibilidade de um CT ficar inativo por falta de carga direta, devido a dispor de uma elevada carga indireta, carga que está a montante do CT. Deste modo, impossibilita o lançamento de trabalhos para o alimentar, mantendo-o parado até que um dos trabalhos lançados chegue a esse CT.

## **2.2 Mecanismo Generic Kanban System**

Os mecanismos de CAP, baseados em *kanbans*, cartões com informações com o tipo de trabalho a realizar, a quantidade de peças a serem transportadas e o tipo de *kanbans*, surgiram no Japão (Chang and Yih (1994)). Os engenheiros da Toyota devolveram o Toyota's Kanban System (TKS), com o objetivo de não só diminuir os níveis de *stock*, como também aumentar a qualidade e o rendimento do sistema de produção. Assim, o mecanismo desenvolvido segue uma filosofia Just In Time (JIT), na qual apenas se produz ou compra a quantidade certa no momento certo (Mortágua (2014)).

O TKS é um sistema "*pull*". Neste, um determinado centro de trabalho só inicia a produção, caso o centro de trabalho subsequente autorizar essa produção. Assim, ao contrário da filosofia "*push*", mesmo que exista *stock* de todos os materiais necessários, a produção só é iniciada se o centro de trabalho seguinte a autorizar (Varela (2015)). No mecanismo, para reduzir o tempo de espera pelos componentes em cada centro de trabalho, é utilizada uma carga constante de trabalho. Assim, existe uma quantidade mínima de trabalhos por processar e a serem processados (Varela (2015)). Deste modo, o TKS é um mecanismo que necessita de um sistema produtivo relativamente estável, com procura constante, o que o torna difícil de adaptar a um sistema mais dinâmico. Por esta razão surgiram alternativas e variações deste mecanismo, entre estas, o GKS proposto por Chang and Yih (1994).

## 2.2.1 Funcionamento do GKS

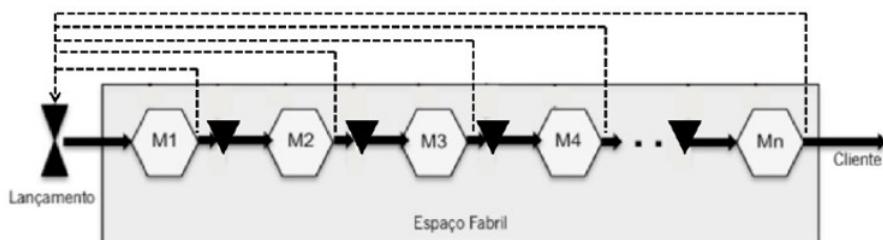
O objetivo do GKS passa por controlar o número de trabalhos a serem realizados num determinado sistema de produção. Neste mecanismo, os cartões são específicos para cada centro de trabalho e, o número disponibilizado, é limitado. Deste modo, um trabalho só é lançado para produção se todos os centros de trabalho necessários para a produção deste elemento, tiverem disponível, pelo menos, um cartão. No momento do lançamento da produção, os cartões são associados aos trabalhos, acompanhando-os ao longo de todo o processamento até ao centro de trabalho a que se referem e, no qual devem iniciar a fase de produção que necessitam. Genericamente, existem dois tipos de cartões associados a recipientes das peças ou trabalhos, sendo estes o "*kanban de transporte*", que indica que o trabalho passa para o centro de trabalho seguinte, e o "*kanban de produção*" de trabalhos, utilizado para ordenar a produção.

No instante em que o conteúdo de um recipiente começa a ser utilizado, o "*kanban de transporte*" é dissociado do mesmo e transportado, com o auxílio de um trabalhador, de forma a obter a peça em questão, do ponto de inventário do processo seguinte, colocando nesse recipiente, o *kanban*. Em seguimento, o "*kanban de produção*", anexado nesse mesmo recipiente, onde foi colocado o "*kanban de transporte*", é removido e transformado em informação de execução. Desta forma, inicia-se a produção da peça anteriormente utilizada, de maneira a reabastecer o sistema, o mais rapidamente possível.

Após a finalização de um trabalho num determinado centro de trabalho, os respetivos cartões são dissociados para que, posteriormente, possam ser alocados a um novo trabalho. No caso não existirem cartões suficientes para a entrada de novos trabalhos nos centros de trabalho, o respetivo lançamento é impedido e adiado até que novos cartões, em número suficiente, estejam disponíveis.

Assim, as atividades de produção do final da linha de montagem, estão conectadas a todos os processos precedentes, concretizando a produção JIT de todo o processo. Varela (2015)

Deste modo, o sistema GKS é considerado um sistema híbrido e "pull-push".



**Figura 2.2:** Modo de operação de mecanismos baseados no GKS

## 2.3 Ordenação das Encomendas

A regra denominada de *Earliest Due Date (EDD)*, tem como objetivo ordenar os trabalhos antes de entrarem na linha de produção, por data de entrega. Deste modo, o trabalho com a data mais próxima da atual, é o primeiro a ser atendido na máquina.

## 2.4 Regras de Despacho

As regras de despacho de trabalho mencionadas abaixo, são impostas na linha de produção da estação fabril, de modo a ordenar os trabalhos nas filas de espera das máquinas.

### 2.4.1 First In System First Served

Na presente regra de despacho de trabalhos, FSFS, o primeiro trabalho a entrar nas filas de espera das máquinas, é o primeiro a ser processado pelas mesmas.

#### **2.4.2 Modified Operation Due Date**

Nesta regra, os trabalhos são ordenados dando prioridade aos mais urgentes. Através do MODD, garantimos que o primeiro trabalho a ser processado pelas máquinas, é o que possui o menor valor de MODD.

### **2.5 Medidas de Desempenho**

O desempenho de uma empresa ou da sua atividade produtiva deve ser avaliado contabilizando os resultados de acordo com os objetivos impostos, a alcançar, através das medidas de desempenho pré estabelecidas pela organização. Estas medidas são essenciais para comparar os resultados obtidos com os esperados e, assim, avaliar a necessidade de atuar para retificar ou alterar trajetórias e planos traçados.Carmo-Silva (2015) Desta forma, foram estabelecidas diferentes medidas de desempenho.

De seguida são apresentadas as diversas medidas analisadas no decorrer do projeto.

#### **2.5.1 Shop Throughput Time**

O STT é a medida correspondente ao tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Através do STT, é possível avaliar o tempo de percurso médio dos trabalhos, no espaço fabril. Um valor acrescido, nesta medida de desempenho, representa elevados níveis de stock e, em consequência, custos de posse de stock maiores.

#### **2.5.2 Total Throughput Time**

O tempo total de percurso reflete o tempo de resposta ao cliente. O TTT corresponde ao tempo desde a criação de entidades até à conclusão das mesmas.

#### **2.5.3 Lateness**

É a medida que caracteriza o atraso antecipado ou tardio relativamente à data de entrega do trabalho. O *Lateness*, devolve a média de trabalhos concluídos em atraso e antecipadamente, relativamente à data de entrega. Um valor positivo desta medida, significa que o sistema termina os trabalhos depois da data de entrega definida, concluindo estes em atraso. Por outro lado, um valor negativo, demonstra que os trabalhos são entregues antes da data prevista, o que implica que estes estejam prontos previamente de acordo com a data prevista para entrega.

#### **2.5.4 Tardiness**

Designa-se por *tardiness*, a medida do atraso, *Lateness*, positiva. Exprime, portanto, o atraso relativamente à data de entrega.

#### **2.5.5 Percent Tardy**

O PTardy, expressa a percentagem de trabalhos em atraso. Este cálculo é feito através do quociente entre o número de trabalhos atrasados, sobre o número total de trabalhos concluídos.

### **2.6 Revisão da Literatura**

Os dois mecanismos CAP analisados, possuem uma grande variedade de pesquisas e publicações realizadas pela comunidade científica.

Desde que proposto por Zäpfel and Missbauer (1993), o WLC, tem sido alvo de diversas pesquisas com o intuito de melhorar o seu desempenho e facilitar a implementação num sistema real de produção.

O WLC tem como princípio base, assegurar a conclusão dos trabalhos, de acordo com os prazos de entrega, fazendo uso de toda a capacidade de cada centro de trabalho. Lawrence D.Fredendall and Patterson (2010), apresentam uma revisão sobre as regras aplicadas a este mecanismo, e, de como os três principais componentes de controlo, sendo estes a ordem das encomendas, o trabalho agregado e o limite de filas, afetam o desempenho do sistema.

Fernandes and Carmo-Silva (2011) simularam um sistema com produção de encomendas de forma continua, com o objetivo de melhorar as normas de implementação do WLC, definindo a melhor estratégia e escolhendo as melhores alternativas de *routing*. Os resultados mostraram que este método tem um impacto significativo no

desempenho do sistema de produção. Mostraram ainda que, não há uma estratégia única que melhore todas as medidas de desempenho. O balanceamento de carga do WLC apresentou melhor desempenho para o TTT e para a percentagem de trabalhos em atraso.

Boxuan Zhao and Xu (2015) investigaram alternativas de *routing* relacionadas com WLC. Neste *paper* são apresentados resultados comparativos de nove métodos heurísticos, assim como de metodologias que combinam alguns destes.

Sagawa and Land (2018) propuseram uma representação dos princípios do WLC, através de um modelo dinâmico baseado num grafo de ligação e de uma modelação do sistema. Os resultados mostraram que é possível representar os princípios deste mecanismo CAP, através deste método.

Pela mesma altura, surgiu no Japão, proposto por Chang and Yih (1994), um mecanismo CAP baseado em cartões, denominado por GKS. Segundo os autores, este mecanismo surgiu como variação do TKS, com o objetivo de o tornar adaptável a um ambiente de produção mais dinâmico. Apesar de existirem menos publicações relativamente ao mecanismo abordado anteriormente, o GKS tem sido, de igual forma, alvo de várias pesquisas por parte da comunidade científica.

J. Schaefers and Colin (2000) demonstraram como a produtividade de um sistema de produção melhorou após a implementação de um sistema *push-pull*, baseado no GKS. Os resultados confirmaram que os problemas enfrentados pelo sistema, tal como longos atrasos do cliente, resultando em custos elevados de posse de stock, foram reduzidos ou eliminados com a aplicação deste mecanismo.

Junior and Filho (2010) apresentaram uma revisão da literatura sobre os mecanismos baseados em *kanbans*. Foram estudados trinta e dois sistemas distintos e, posteriormente, classificados segundo seis categorias diferentes. Os autores descrevem ainda, através de um breve sumário, cada variação estudada. Para além disso, expuseram uma grande dissemelhança entre a quantidade de publicações teóricas, cerca de setenta por cento, relativamente a práticas, apenas trinta por cento, sobre este tipo de mecanismos.

C. Silva and Carmo-Silva (2017) apresentaram um estudo comparativo do desempenho de três mecanismos CAP alternativos, baseados em cartões, TKS, GKS e POLCA. A pesquisa, desenvolvida através da simulação em ambiente de produção flexível, revelou que, apesar do TKS apresentar melhor desempenho que o POLCA, a sua *performance* era inferior, quando comparada com a do GKS. Os autores salientaram ainda que o desempenho do sistema, controlado pelos mecanismos em estudo, apenas sofria uma ligeira redução do valor do STT, sem comprometer os valores do TTT e do PTardy.

O *software* de simulação utilizado, SIMIO, apresenta, como sugerem Dehghanmohammabadi and Keyser (2017), as características necessárias e adequadas para a representação do desempenho de um sistema de produção real.

Nas secções seguintes, são abordadas as implementações do mecanismos em estudo, no SIMIO, assim como os resultados obtidos com este *software*.

### 3. Descrição do sistema de produção

Os modelos de simulação descritos neste capítulo surgem com o objetivo de representar a realidade de um processo de produção de um conjunto de trabalhos no espaço fabril, constituído por uma linha com seis centros de trabalho.

Evidenciam-se várias variantes de cada modelo, a fim de incluir inúmeras realidades que esta instituição pode acomodar. Assim, todos os modelos apresentados incluem vertentes constituídas por três ou cinco trabalhadores, movimentados segundo duas regras distintas, sendo estas denominadas de *Standard* e *Acompanhamento Fim de Linha*. Existem também, duas regras de despacho FSFS ou MODD, que ordenam os trabalhos nas filas de espera de cada um dos centros de trabalho.

#### 3.1 Implementação do modelo de simulação

Os modelos de simulação construídos, possuem todos o mesmo aspecto, presente na figura 3.1, diferenciando apenas por processos, cada uma das vertentes já mencionadas.

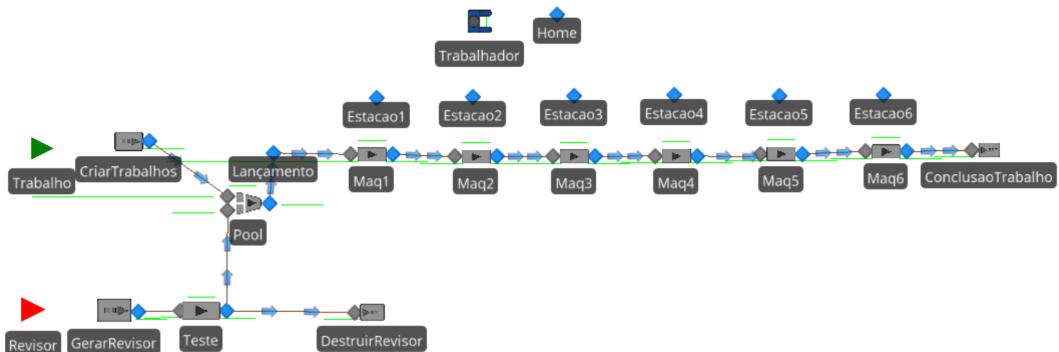


Figura 3.1: Modelo Geral do Sistema de Produção SIMIO

##### 3.1.1 Gerar Encomendas

Sendo o presente modelo de simulação, baseado em dois mecanismos CAP, cujo princípio é a produção por encomenda MTO, foi necessário iniciar este modelo por uma *SOURCE* denominada de *CriarTrabalhos*, cujo objetivo é criar encomendas de trabalhos. Com o intuito de se obter uma taxa de utilização dos trabalhadores de, aproximadamente, noventa porcento, utilizou-se um intervalo de chegadas que segue uma distribuição *exponencial* de média 2.05 para o modelo com três trabalhadores e, um intervalo de chegadas com uma distribuição *exponencial* de média 1.24 para o modelo com cinco operadores.

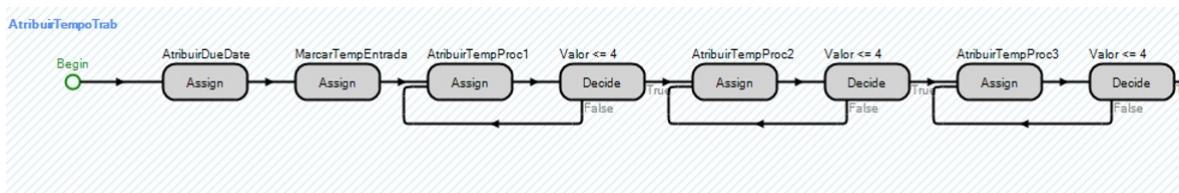
Assim, criou-se uma entidade denominada de *Trabalho*, de modo a representar as encomendas que chegavam ao sistema. Para cada encomenda, foi necessário atribuir uma data de entrega para o respetivo trabalho, assim como um tempo de processamento em cada um dos CT. Para esse efeito, criaram-se duas variáveis, associadas à entidade *Trabalho*. A primeira, *DueDate*, é uma variável do tipo real, que guarda a informação relativa à data de entrega do trabalho. A segunda, *TempProc*, é um vetor com 6 posições, que conserva, em cada posição, o tempo de processamento do trabalho em cada máquina.

### 3.1.1.1 Processo para Atribuir Tempos de Processamento e Datas de Entrega

Sempre que uma encomenda é criada, ao entrar no nodo *output* da *SOURCE*, aciona um processo cuja finalidade é atribuir tempos de processamento e datas de entrega a cada entidade.

Como se observa na figura 3.2, utilizou-se um *Step Assign*, (*AtribuirDueDate*), com a finalidade de atribuir à variável *DueDate*, uma data de entrega seguindo uma distribuição *uniforme* de mínimo trinta e máximo cinquenta horas.

Posteriormente, adicionou-se um novo *Step Assign*, (*AtribuirTempProc1*), com o objetivo de atribuir ao vetor *TempProc*, na primeira posição, o tempo correspondente ao processamento do trabalho na primeira máquina. Neste caso, utilizou-se uma distribuição *exponencial* (1). De modo a garantir que o valor registado não excedia as 4 horas, utilizou-se um *Step Decide*, (*Valor <= 4*), que verifica se o valor guardado no vetor não é superior a 4 horas. Caso a condição não se confirme, atribui-se um novo valor ao vetor *TempProc* na primeira posição. Este processo é repetido para as seis posições do vetor, garantindo que existe um tempo de processamento atribuído para cada centro de trabalho.

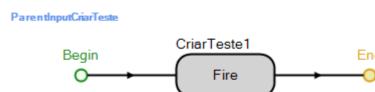


**Figura 3.2:** Processo para atribuir tempos de trabalho e datas de entrega a cada trabalho

Após as entidades serem concebidas e, contendo a informação relativa à data de entrega e aos tempos de processamento em cada centro de trabalho, dirigem-se para o *combiner pool*.

### 3.1.2 Ordenação na pool

As entidades, após serem geradas, são dirigidas para o nodo *ParentInput* da *pool*. Estas aguardam no nodo referido, até ser dada uma ordem de produção. É neste instante de tempo que é disparado o evento *CriarRevisor* que gera um Teste, que será abordado de seguida.

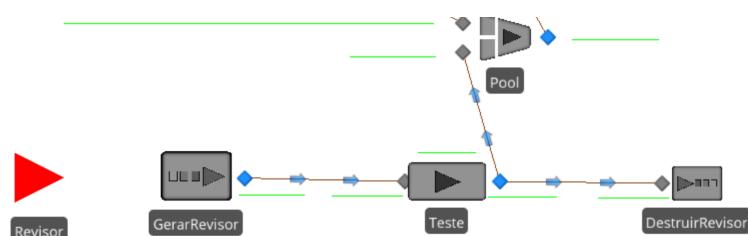


**Figura 3.3:** Processo para disparar o evento *CriarRevisor*

Na fila de espera da *Pool*, todos os trabalhos são ordenados segundo a regra EDD, já explicada. Assim, é garantido que os trabalhos que se encontram nesta, são lançados para produção de maneira a satisfazer a data de entrega dos diferentes clientes.

### 3.1.3 Teste

Tal como se observa na figura 3.4, foi adicionada uma segunda *SOURCE*, designada por *GerarRevisor*, com o propósito de formar uma nova entidade, denominada de *Revisor*, para verificar, sempre que solicitado, se a condição de lançamento, correspondente ao mecanismo utilizado, se verifica. Assim, a fim de não sobrecarregar o modelo, esta nova entidade apenas é criada quando o evento *CriarRevisor* é disparado.



**Figura 3.4:** Teste que verifica se o trabalho pode ser lançado para o espaço fabril

Após as entidades serem criadas, dirigem-se para o *SERVER Teste*. O *Teste* é responsável por garantir, através de um processo, se o trabalho pode ser lançado para a linha de produção, de acordo com o mecanismo CAP utilizado, a ser explicado de seguida. Caso as entidades *Revisor* passem no *Teste*, dirigem-se para o nodo *MemberInput* da *Pool*. Neste preciso momento, estão reunidas as condições necessárias para que um trabalho seja lançado no espaço fabril. Caso contrário, se a condição do *Teste* não se verificar, as entidades dirigem-se para o *SINK DestruirRevisor*, onde são destruídas.

Após o lançamento de um trabalho para o sistema de produção, este é encaminhado para o primeiro centro de trabalho. As filas de espera de todas as máquinas do sistema de produção podem ser ordenadas segundo duas regras distintas, a FSFS ou a MODD.

### 3.1.4 Regra de despacho - FSFS

Na regra de despacho FSFS, os trabalhos não podem alterar a sua ordem de processamento, mantendo, assim, a sequência de chegada ao centro de trabalho. Este método de organização de trabalhos nas filas de espera de cada uma das seis máquinas, não exigiu a implementação de nenhum processo, uma vez que os trabalhos são realizados pela ordem de chegada à fila de espera da máquina, sendo este mecanismo, o predefinido no *SIMIO*.

### 3.1.5 Regra de despacho - MODD

Para implementar a presente regra de despacho, formularam-se duas variáveis associadas às entidades. A primeira, denominada *ODD*, é um vetor com seis posições, que guarda um valor diferente para cada uma destas, dependendo da máquina em que o trabalho se encontra. A segunda, *MODD*, é um outro vetor com seis posições, que, em cada uma destas, recebe o valor máximo entre o valor guardado no *ODD* e zero.

Para calcular o valor do *ODD* para cada posição do vetor, utilizaram-se as seguintes expressões:

$$ODD[1] = DueDate - 5 * LeadTime \quad (3.1)$$

$$ODD[1] = DueDate - 5 * LeadTime \quad (3.2)$$

$$ODD[2] = DueDate - 4 * LeadTime \quad (3.3)$$

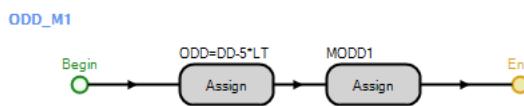
$$ODD[3] = DueDate - 3 * LeadTime \quad (3.4)$$

$$ODD[4] = DueDate - 2 * LeadTime \quad (3.5)$$

$$ODD[5] = DueDate - LeadTime \quad (3.6)$$

$$ODD[6] = DueDate \quad (3.7)$$

As equações são executadas tendo em consideração as datas de entrega, guardadas na variável *DueDate*, os tempos médios de permanência dos trabalhos nas seis máquinas, que englobam o tempo médio de processamento destes, e o tempo de retenção na fila de espera das máquinas. Por último, também são considerados para o cálculo, o produto entre os tempos médios de permanência dos trabalhos na máquina e o número de máquinas que o trabalho ainda tem de percorrer, antes da conclusão a sua produção na estação fabril. Para este conceito ser concretizado, foi necessário criar seis processos, tal como o exposto na figura 3.5.



**Figura 3.5:** Processo de atribuição do MODD e ODD a cada entidade

Após o cálculo do valor do *ODD*, atribui-se a cada posição do vetor *MODD*, o valor máximo entre 0 e o valor de *ODD*, de acordo com o grupo de equações 3.8 a 3.11.

$$MODD[1] = \text{MAX}(0, ODD[1]) \quad (3.8)$$

$$MODD[2] = \text{MAX}(0, ODD[2]) \quad (3.9)$$

$$MODD[3] = \text{MAX}(0, ODD[3]) \quad (3.10)$$

$$MODD[4] = \text{MAX}(0, ODD[4]) \quad (3.11)$$

$$MODD[5] = \text{MAX}(0, ODD[5]) \quad (3.12)$$

$$MODD[6] = \text{MAX}(0, ODD[6]) \quad (3.13)$$

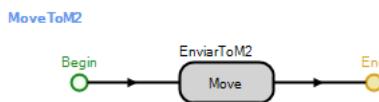
Assim, após estes cálculos, os trabalhos são ordenados nas filas de espera de todas as máquinas, pelo menor valor de  $MODD$ . Desta forma, garante-se que o primeiro trabalho a ser processado é o que apresenta maior urgência, tendo em conta a data de entrega e o tempo que este irá permanecer em cada CT, considerando o tempo de espera na fila e o tempo de processamento na máquina. Este conceito, é também conhecido por *leadtime*.

### 3.1.6 Workers - Standard

O trabalhador que se movimenta de acordo com a regra *Standard*, tem uma lista de tarefas com a informação da máquina para onde tem de se dirigir, a fim de executar um trabalho na mesma. O operário, dirige-se para o primeiro CT que o solicitou. Este tipo de movimentação é a predefinida no *SIMIO*.

### 3.1.7 Workers - Acompanhamento do trabalho até ao fim da linha de produção

O trabalhador que acompanha os trabalhos até ao final da linha de fabrico, AFL, primeiramente, vai alocar-se ao trabalho que está a ser processado na máquina um. Em seguida, quando este trabalho estiver a ser processado no CT dois, o mesmo trabalhador irá processá-lo. Este procedimento repete-se até o trabalho completar a sua produção, na máquina seis da estação fabril. Deste modo, todos os funcionários da fábrica, acompanham todos os trabalhos desde o seu processamento no primeiro centro de trabalho, largando apenas este, no último. Para esta movimentação, tal como a figura 3.6 evidencia, foram efetuados cinco processos para garantir a transição do agente fabril, de máquina para máquina.



**Figura 3.6:** Processo que garante a movimentação do trabalhador que acompanha os trabalhos até ao fim da linha de produção

### 3.1.8 Medidas de Desempenho

Com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema, foram implementadas várias medidas de desempenho.

#### 3.1.8.1 STT

Para a implementação desta medida de desempenho, foi criada uma variável, *TimeStampLançamento*, que preserva o instante de simulação no qual o trabalho é lançado para a linha de produção, através do processo visível na figura 3.7. Posteriormente, criou-se um *Tally*, denominado *STT*, que regista, no *Input* do *Sink ConclusãoTrabalhos*, a diferença entre o tempo em que o trabalho foi concluído e o momento de lançamento do mesmo. No final da simulação, o *STT*, devolve a média de tempo de percurso no espaço fabril, de todos os trabalhos.



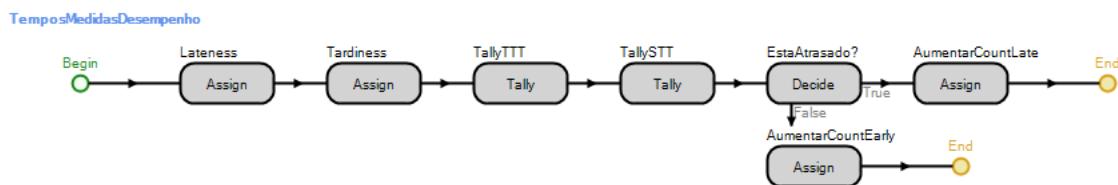
**Figura 3.7:** Processo que regista o tempo de lançamento do trabalho no sistema de produção

### 3.1.8.2 TTT

Esta medida de desempenho exige a génesis de uma variável, *TimeStampEntrada*, que preserva o instante de tempo em que uma encomenda é formada na *SOURCE*, *CriarTrabalhos*, através do processo visível na figura 3.2. Posteriormente, criou-se um *Tally*, denominado *TTT*, que regista, no *Input* do *Sink*, *ConclusãoTrabalhos*, a diferença entre o tempo em que o trabalho foi concluído e o momento de constituição da encomenda. No final da simulação, o *TTT*, devolve a média da duração de resposta ao cliente, de todos os trabalhos.

### 3.1.8.3 Lateness

De forma a contabilizar o *Lateness* dos trabalhos, foi necessário criar uma variável auxiliar, *AuxLateness*. Esta, recebe a diferença entre o valor do tempo real de simulação, naquele momento, *TimeNow* e, a data de entrega em que se supõe que o trabalho estará concluído, *DueDate*. Para contabilizar este intervalo de tempo, foi adicionado um elemento no *SIMIO*, *State Statistic*, denominado de *Lateness*, tal como o demonstrado na figura 3.8. No final da simulação, esta medida devolve o valor correspondente ao atraso ou adiantamento dos trabalhos concluídos.



**Figura 3.8:** Processo que regista o tempo de lançamento do trabalho no sistema de produção

### 3.1.8.4 Tardiness

Para implementar esta medida de desempenho, formou-se uma variável auxiliar, *AuxTardiness*, que recebe o valor máximo entre zero e o valor guardado na variável *AuxLateness*, como se pode observar na figura 3.8. Para contabilizar o atraso médio dos trabalhos, utilizou-se um elemento no *State Statistic* do *SIMIO*, designado por *Tardiness*. No final da simulação, este elemento devolve o valor médio do atraso de todos os trabalhos concluídos.

### 3.1.8.5 Ptardy

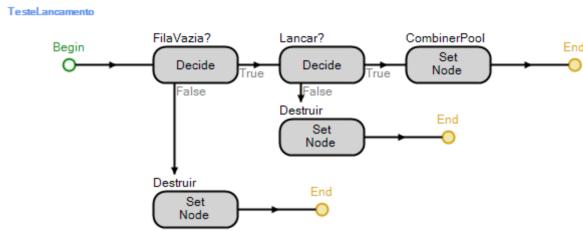
Para calcular a percentagem de trabalhos em atraso, utilizaram-se duas variáveis auxiliares, *CountLate* e *CountEarly*. Como é visível na figura 3.8, criou-se um *Step Decide*, com o objetivo de verificar se o tempo real de simulação é superior à data planeada para a entrega do trabalho. Caso essa condição se verifique, a variável *CountLate* é incrementada em um valor. Caso contrário, a *CountEarly* é incrementada um valor. Em seguimento, acrescentou-se um elemento no *SIMIO OutPutStatistic*, denominado de *PTardy*, cuja função reside em devolver a percentagem de trabalhos em atraso. Desta forma, a equação sobre a qual o *PTardy* é calculado, está exposta na equação 3.14.

$$PTardy = \frac{CountLate}{(CountLate + CountEarly)} * 100 \quad (3.14)$$

## 3.2 Implementação do Workload Control

Para implementar o WLC, garantiu-se que um trabalho só é lançado para produção se existir disponibilidade de carga, em todas as máquinas da linha de produção, para o processar. Com esse intuito, criaram-se seis variáveis reais, denominadas *CargaX*, nas quais X representa o número da máquina na linha de produção. As variáveis contabilizam, para cada instante, a carga de trabalho associada à respetiva estação de produção. Como já foi referido anteriormente,

utilizou-se um processo, apelidado de *Teste*, que analisa se a condição desejada, para este mecanismo, se verifica. Este processo, exposto na figura 3.9, é acionado sempre que uma entidade *Revisor* entra no SERVER *Teste*.



**Figura 3.9:** Processo que verifica se um trabalho pode ser lançado de acordo com o mecanismo CAP WLC

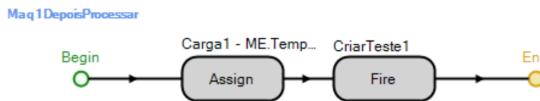
Neste processo, empregou-se primeiramente, um *Step Decide*, chamado *FilaVazia?* para averiguar se existem entidades no *ParentInput* da *pool*. Caso a fila se encontre vazia, o que implica que não existam encomendas a aguardar uma ordem de produção, a entidade *Revisor*, é destruída. Por outro lado, se encontrem entidades na fila de espera da *pool*, o *Revisor* avança para um novo *Step Decide*, denominado *Lançar?*, no qual se averigua se o sistema tem capacidade para receber um novo trabalho. Deste modo, de acordo com o método escolhido para contabilizar a carga, MCAj, foi necessário garantir que nenhuma das variáveis *CargaX* associadas aos centros de trabalho, somadas com o respetivo tempo de processamento da primeira entidade *Trabalho* na fila de espera, devidamente ajustado, excede o limite de carga definido para cada experiência. Assim, caso a condição se confirme, o *Revisor* é enviado para o *MemberInput* da *pool*, originando uma ordem de produção. Na eventualidade de alguma das máquinas não ter capacidade para receber um novo trabalho, o *Revisor* é destruído e o *Trabalho*, permanece no *ParentInput* da *pool*.

No casualidade de um trabalho ser lançado, este entra no *Output* da *pool* e ativa o processo *IncrementarTempoProcTodasMaquinas*, como pode ser observado na figura 3.10. Através deste processo, a carga de trabalho associada a cada máquina é atualizada, sendo incrementado à mesma, o tempo de processamento ajustado para o respetivo CT.



**Figura 3.10:** Processo que atualiza a carga de trabalho de cada máquina após o lançamento de um novo trabalho

Para garantir o correto funcionamento do modelo, adicionou-se ainda, um último processo no *Output* de cada máquina, para garantir que sempre que um trabalho acaba de ser processado, o seu tempo de processamento ajustado, é retirado da variável *CargaX*, como está exposto na figura 3.11. Deste modo, assegura-se que a carga associada a cada centro de trabalho se mantém atualizada em cada instante.



**Figura 3.11:** Processo que atualiza a carga de trabalho de cada máquina após o processamento do trabalho

Após a atualização da carga de cada centro de trabalho, considerou-se importante averiguar se um novo trabalho poderia ser lançado para sistema fabril. Para esse efeito, utilizou-se um *Step Fire* que dispara o evento *CriarRevisor*. Através deste, a *SOURCE GerarRevisor*, gera uma entidade que vai realizar o *Teste*, como explicado anteriormente.

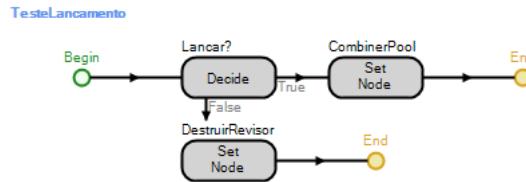
Através destes processos, assegurou-se a implementação do mecanismo WLC.

### 3.3 Implementação do Generic Kanban System

Para implementar este segundo mecanismo, baseado em cartões, foram usadas seis variáveis do tipo inteiro, denominadas *KanbanX*, nas quais *X* representa o número da máquina no sistema fabril. Através destas variáveis é possível, em cada instante, saber quantos cartões de cada máquina estão disponíveis para lançar um trabalho em produção. Em cada experiência, limitou-se o número destes disponíveis em cada CT.

Como já referido, o processo denominado *TesteLançamento* é ativado sempre que um *Revisor* é processado no SERVER *Teste*. Neste, adicionou-se um *Step Decide* que afere, de acordo com o mecanismo GKS, se existe pelo

menos um cartão de cada máquina livre, de maneira a que o trabalho possa ser lançado. Para além deste requisito, o *Step Decide* apura se alguma entidade *Trabalho* se encontra na fila de espera do *ParenInput* da *pool*, aguardando para ser processada. Sempre que ambas as condições são respeitadas, o *Revisor* dirige-se para o *MemberInput* da *pool*, onde é combinado com um *Trabalho*, lançando este último, para o espaço fabril. Por outro lado, como se também se observa na figura 3.12, quando a condição não é respeitada, o *Revisor* é destruído.



**Figura 3.12:** Processo que verifica se um trabalho pode ser lançado, com o mecanismo CAP, GKS

Após o lançamento, é necessário que os cartões reservados para a produção deste trabalho, deixem de estar disponíveis. Desse modo, no *Output* da *pool*, é acionado um processo, exposto na figura 3.13, que incrementa um valor na variável *KanbanX*.



**Figura 3.13:** Processo que incrementa uma unidade em todas as variáveis *Kanban*

Deste modo, assegura-se que todos os cartões necessários para o processamento do trabalho na linha de produção, estão reservados.

Da mesma forma, sempre que um trabalho termina o seu processamento numa determinada máquina, é libertado um cartão de produção, associado à mesma. Com esse objetivo, no *Output* de todos os SERVERS representativos das máquinas da linha de produção, são acionados processos, como o que é visível na figura 3.14, em que se decrementa uma unidade à variável *KanbanX*.



**Figura 3.14:** Processo que decrementa uma unidade na variável *Kanban*, correspondente à máquina que terminou o processamento do trabalho

Após a libertação de um cartão de produção, é disparado o evento *CriarRevisor*, através de um *Step Fire*. Como o mencionado anteriormente, este evento gera um *Revisor* que, por sua vez, indaga se um novo trabalho pode ser lançado no sistema de produção.

Desta forma, através da implementação destes três processos, assegurou-se a implementação do mecanismo GKS.

## 4. Análise de resultados

### 4.1 Testes Inicias

A fim de obter resultados com a confiança desejável, foi necessário definir o número de *kanbans* ideais para cada mecanismo e modelo testado. Assim, realizaram-se várias experiências com diferentes cenários. Em cada experiência, foram feitas 100 replicações, com um tempo de simulação, *replication lenght*, de 13000 horas e com período de aquecimento, *warmup period*, de 3000 horas.

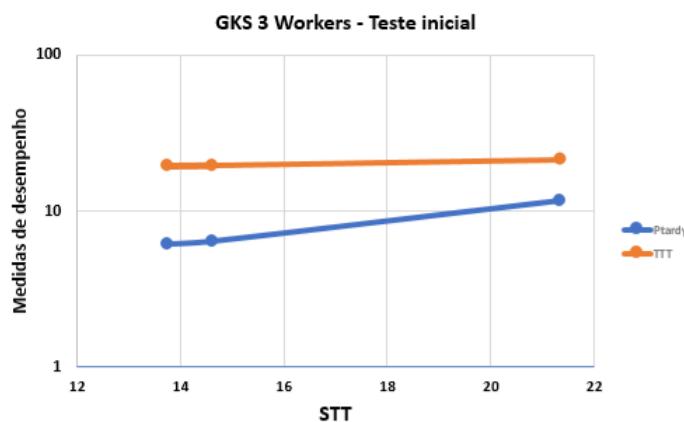
O exemplo que se segue serviu de teste para uma análise inicial, com apenas 3 cenários, com os valores de 9, 10 e 1000000000 *kanbans*, respectivamente. Este último valor, representa um número infinito de *kanbans*, com o objetivo de verificar que as utilizações de todos os trabalhadores da estação fabril, se encontravam conforme o imposto no enunciado do projeto, a rondar os noventa por cento. A análise em causa, serviu para verificar em que ponto da curva se poderiam encontrar os pontos que minimizam os valores do STT, face às diferentes medidas de desempenho.

No exemplo da tabela 4.1, a percentagem de trabalhos em atraso diminui ligeiramente, quando se restringe o número de *kanbans* reduzindo, em simultâneo, o STT. Desta forma, garante-se que é possível reduzir as despesas em *stock*, até um certo ponto, sem aumentar a percentagem de trabalho em atraso. Pode-se também restringir o STT sem comprometer o TTT.

**Tabela 4.1:** Valores do teste inicial

STT	Ptardy	TTT	Kanbans
13,7711	6,11909	19,3403	9
14,6364	6,38712	19,4855	10
21,3515	11,5943	21,3539	infinito

Foram feitos testes para todos os cenários, onde se obtiveram os valores ajustados para o número de *kanbans*, no caso de se tratar do mecanismo GKS, e de horas para o caso do WLC. O raciocínio foi o de aumentar ou diminuir esse número, obtendo assim, a curva pretendida.



**Figura 4.1:** Gráfico Testes Iniciais

Em seguimento do exemplo acima mencionado, ter-se-ia que diminuir o número de *kanbans* isto é, testar cenários com menos de 9 *kanbans*, como o evidenciado na figura 4.1, para posteriormente, avaliar as medidas de desempenho.

## 5. Análise de resultados modelo WLC

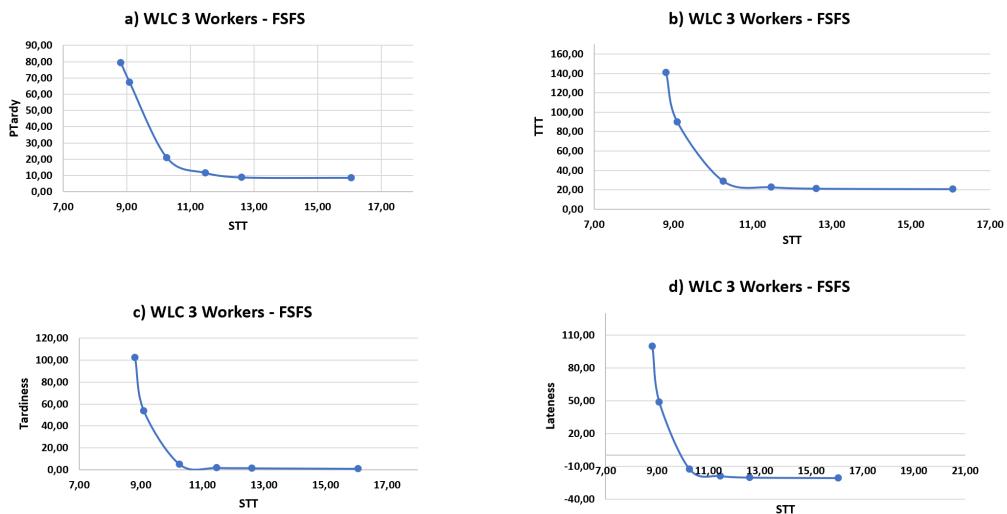
Esta secção tem o intuito de apresentar e analisar os resultados obtidos, de forma a encontrar um possível melhor cenário para cada modelo WLC, com as diversas vertentes. Foram simulados vários cenários, onde se foi alterado o número de horas de carga disponível na linha de produção. Recorreu-se às medidas de desempenho PTardy, TTT, Lateness e Tardiness, para alcançar a carga que minimiza os valores correspondentes ao intervalo de tempo, desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Caso as medidas de desempenho apresentem valores elevados, os níveis de stock, por consequência, aumentarão, o que incorrerá em custos adicionais. Para tal, são exibidos vários gráficos ajustados, que permitem visualizar um possível ponto mínimo na curva das diferentes medidas de desempenho.

### 5.1 Modelo WLC com movimentação Standard e regra de despacho FSFS

#### 5.1.1 Três Trabalhadores

Na figura 5.1, estão expostos os gráficos ajustados apenas com 6 pontos. Foram usadas as cargas de valor 1.2, de 1.25, de 1.5, de 1.75, de 2 e de 3 horas. Uma vez que os valores testados evidenciavam-se discrepantes, não sendo visível o ponto que permitia minimizar o tempo de processamento, decidiu-se fazer testes adicionais, para valores de carga mais próximos, no intervalo entre uma e duas horas.

O tempo de percurso do trabalho, para estes pontos analisados, varia aproximadamente entre 9 e 16 horas. Como o objetivo é minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem comprometer as medidas de desempenho mencionadas acima, após a análise dos gráficos a), b), c) e d) da figura 5.1, conclui-se que um possível melhor cenário para estas medidas de desempenho seria o ponto de 1.5 horas de tempo de carga do sistema, apresentando 10.26 horas de tempo de processamento do trabalho.

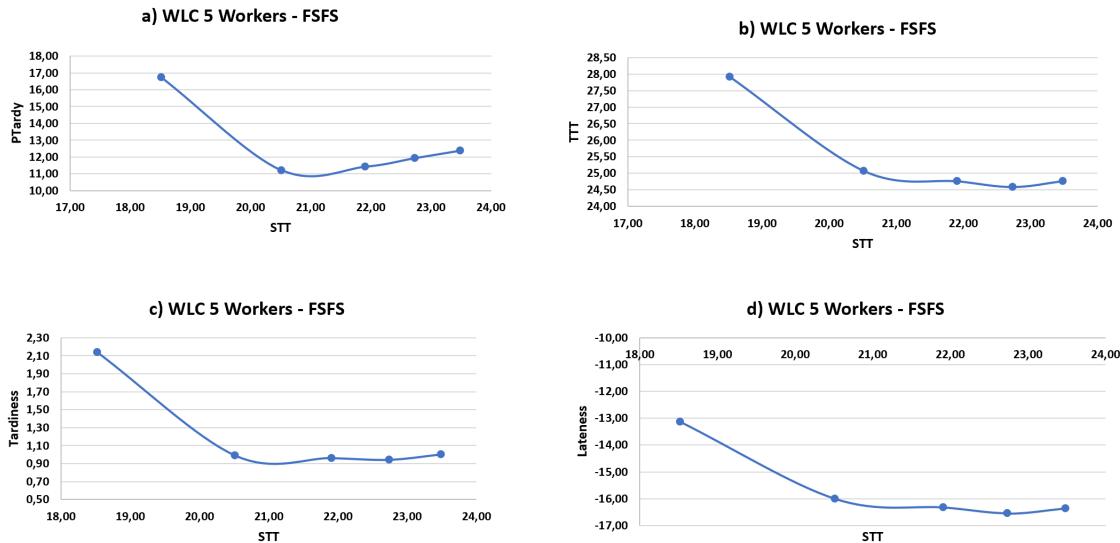


**Figura 5.1:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

### 5.1.2 Cinco Trabalhadores

Para o modelo em causa, a característica diferenciadora é o número de trabalhadores, passando este para cinco.

Os gráficos apresentados na figura 5.2, apresentam apenas os cinco pontos que permitem uma melhor visualização do ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado para o espaço fabril, até à sua conclusão. Estes pontos apresentam valores de 4, de 4.25, de 4.5, de 4.75 e de 5 horas. Verifica-se que, segundo a análise dos gráficos a), b), c) e d), apresentados na figura 5.2, o STT varia entre 18.5 e 23.5 horas. De igual forma, constatou-se que o possível melhor cenário teria como carga 4.25 horas e 20.51 horas relativamente ao tempo de processamento do trabalho, correspondendo, assim, ao segundo ponto nestes gráficos.

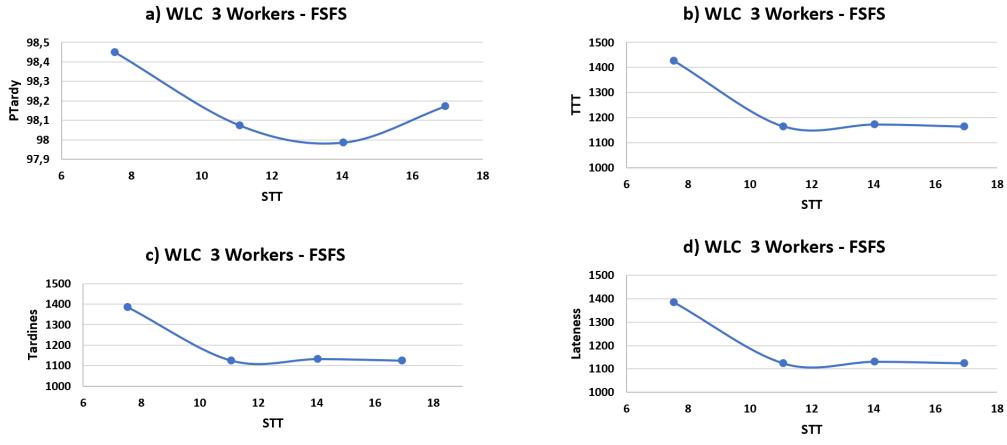


**Figura 5.2:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 5.2 Modelo WLC com acompanhamento até ao Fim de Linha e regra de despacho FSFS

### 5.2.1 Três Trabalhadores

Os resultados apresentados na figura 5.3, são referentes aos modelos em que o trabalhador acompanha o trabalho desde o inicio até ao fim de linha de produção, com a regra de despacho FSFS e utilizando 3 trabalhadores. Os gráficos expostos nesta figura, foram ajustados, apresentando os 4 pontos com as respetivas cargas de 1, de 2, de 3 e de 4 horas. Para esta vertente do modelo, não se considerou necessário testar cargas horárias intermédias, pois os valores das medidas de desempenho denotaram-se bastante próximos, o que evidenciou, de imediato, o ponto que minimiza o tempo de processamento. O STT, varia aproximadamente entre 7 e 17 horas. Com o intuito de minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, não comprometendo as medidas de desempenho, elaboram-se os gráficos a), b), c) e d) da figura 5.3. Conclui-se que, após a análise da figura, um possível melhor cenário seria o de carga horária de 2 horas, refletindo, aproximadamente, 11 horas de tempo de processamento de um trabalho.

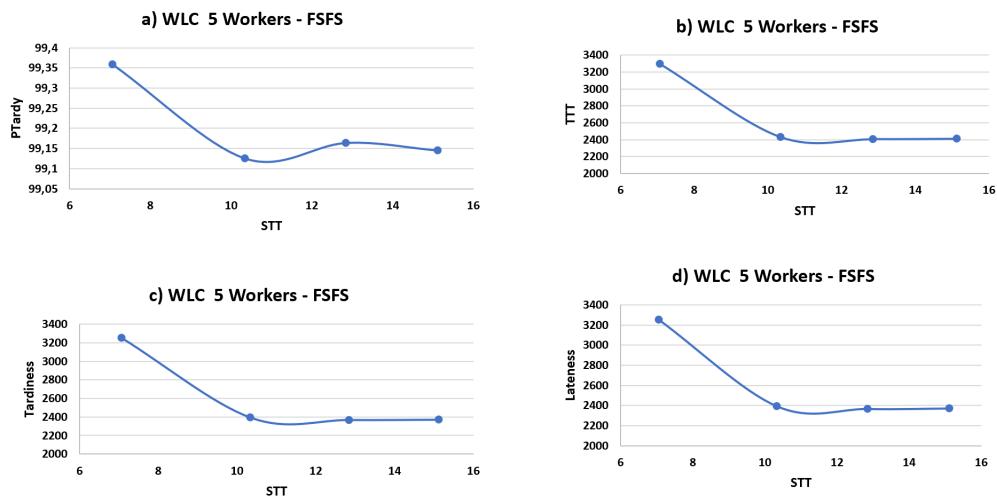


**Figura 5.3:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

### 5.2.2 Cinco Trabalhadores

No modelo que se segue, a característica diferenciadora em relação ao modelo anterior, é o número de trabalhadores, passando agora cinco.

Os gráficos apresentados na figura 5.4, apresentam apenas os quatro pontos que permitem uma melhor visualização do ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Estes pontos tem o valor de 1, de 2, de 3 e de 4 horas. O STT varia entre 7 e 15 horas. Após o estudo dos gráficos a), b), c) e d) apresentados, constatou-se que o possível melhor cenário teria a carga de 2 horas, correspondendo a 10.34 horas de tempo de processamento do trabalho, tratando-se do segundo ponto nos gráficos apresentados.



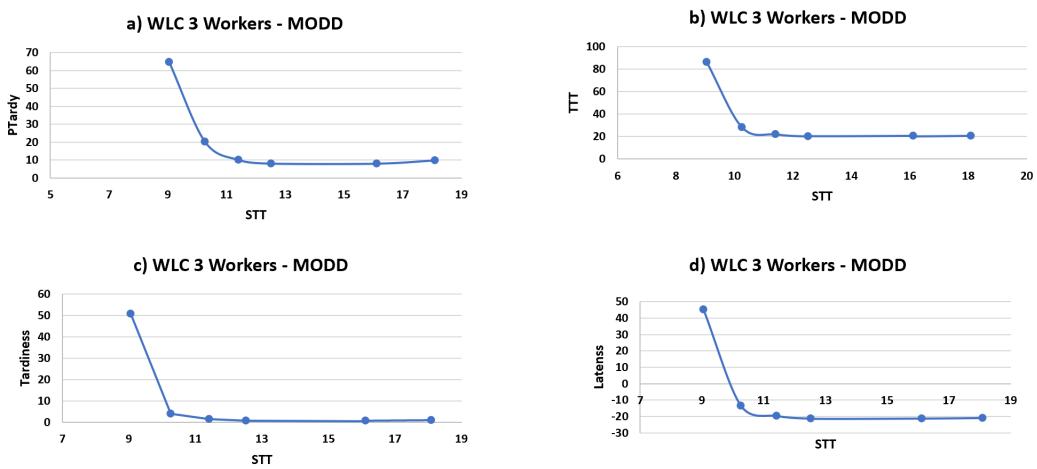
**Figura 5.4:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 5.3 Modelo WLC com movimentação *Standard* e regra de despacho *MODD*

### 5.3.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo WLC com a regra de despacho MODD, com três trabalhadores, estão presentes na figura 5.5. Os gráficos foram ajustados para 6 pontos, com cargas de 1.25, de 1.5, de 1.75, de 2, de 3 e de 4 horas. Decidiu-se, assim, efetuar testes adicionais, para cargas com valores entre os uma e duas horas, uma vez que os inicialmente testados, constatavam-se divergentes, não permitindo uma boa visualização do ponto que permitiria minimizar o tempo de processamento. Posto isto, o tempo de percurso do trabalho, para os pontos analisados, varia aproximadamente entre 9 e 18 horas.

Com o propósito de minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem prejudicar as medidas de desempenho, foram elaborados os gráficos a), b), c) e d), presentes figura 5.5. Conclui-se que o cenário cujos resultados seriam mais viáveis, apresentava 1.5 horas de tempo de carga do sistema e 10.26 horas como tempo de processamento do trabalho.

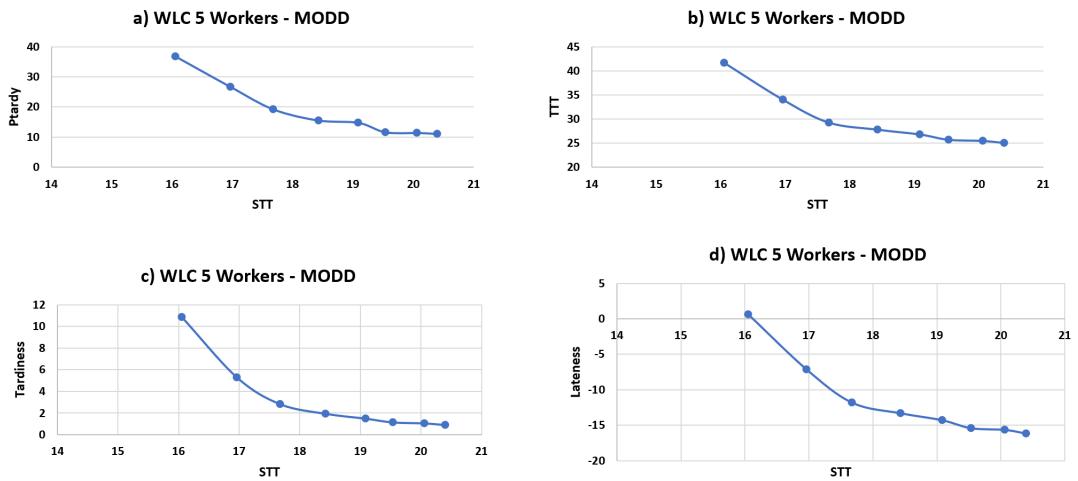


**Figura 5.5:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

### 5.3.2 Cinco Trabalhadores

Para este modelo, o número de trabalhadores foi acrescido para cinco.

Os gráficos apresentados na figura 5.6 apresentam oito pontos, de forma a permitir a visualização do ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Estes oito pontos têm o valor de 3.25, de 3.5, de 3.75, de 4, de 4.25, de 4.5, de 4.75 e de 5 horas. Optou-se por fazer testes adicionais, para cargas entre as 3 e 5 horas, uma vez que os valores eram discrepantes e não permitiam a distinção do ponto que minimizava o tempo de processamento. Assim, o STT varia entre 16 e 20 horas. Constatou-se, também que, o possível melhor cenário teria como carga 3.75 horas e 17.68 horas de tempo de processamento do trabalho, correspondendo ao terceiro ponto nestes gráficos.



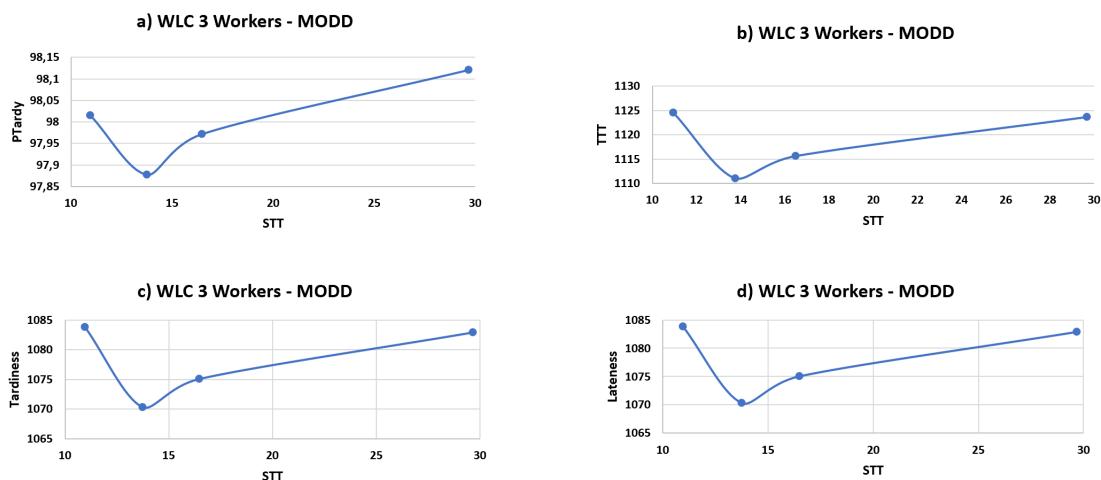
**Figura 5.6:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador Standard e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o *Tardiness* e o d) avalia o *Lateness*

## 5.4 Modelo WLC com movimentação AFL e regra de despacho MODD

### 5.4.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo WLC, com a regra de despacho MODD, com três trabalhadores, estão presentes na figura 5.7, onde estão expostos os gráficos ajustados com apenas 4 pontos. Foram usadas as cargas de 2, de 3, de 4 e de 9 horas. O tempo de percurso do trabalho, para estes pontos analisados, varia aproximadamente, entre 10 e 29 horas.

Como o objetivo é minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem afetar os valores das medidas de desempenho PTardy, TTT, Lateness, Tardiness, após a análise dos gráficos a), b), c) e d), da figura 5.7, conclui-se que, um possível melhor cenário para estas, seria o ponto que aponta 3 horas de tempo de carga do sistema, apresentando 13.76 horas de tempo de processamento de um trabalho.



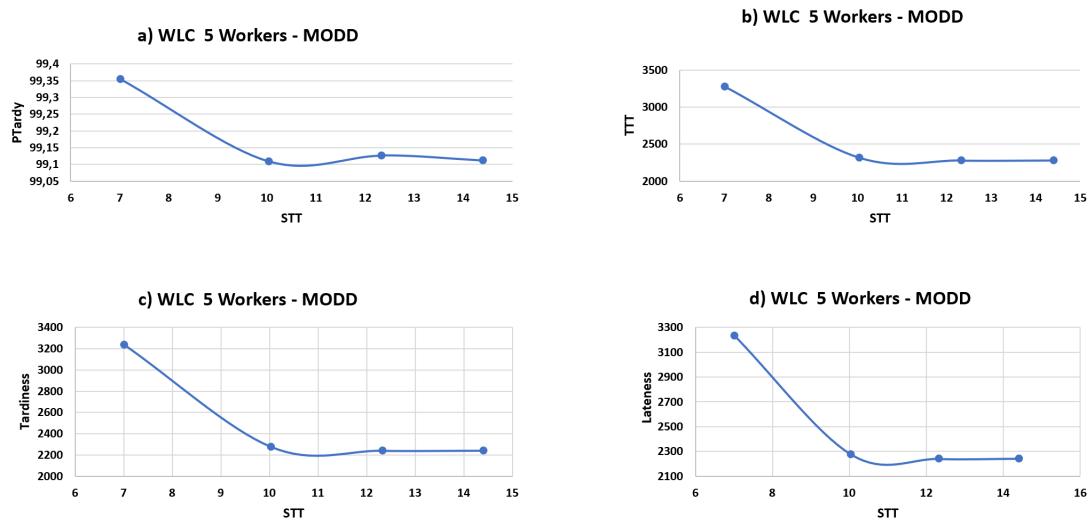
**Figura 5.7:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o *Tardiness* e o d) avalia o *Lateness*

#### 5.4.2 Cinco Trabalhadores

Este modelo, foi formulado como o anterior, diferenciando, apenas o número de trabalhadores, passando estes para cinco.

Os gráficos apresentados na figura 5.8 apresentam apenas quatro pontos. Estes são os que permitem distinguir o ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Os pontos têm os valores de uma, de duas, três e de quatro horas.

Através da análise da figura, constata-se que, o STT varia entre 7 e 14 horas. Realça-se ainda que, o possível melhor cenário apresenta uma carga de 2 horas e aproximadamente 10 horas de tempo de processamento do trabalho, correspondendo ao segundo ponto nestes gráficos.



**Figura 5.8:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo WLC de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 6. Análise de resultados modelo GKS

A presente secção serve para exibir e analisar os resultados obtidos, através do estudo elaborado, com o intuito de encontrar um possível melhor cenário para cada modelo GKS, de acordo com as diversas vertentes.

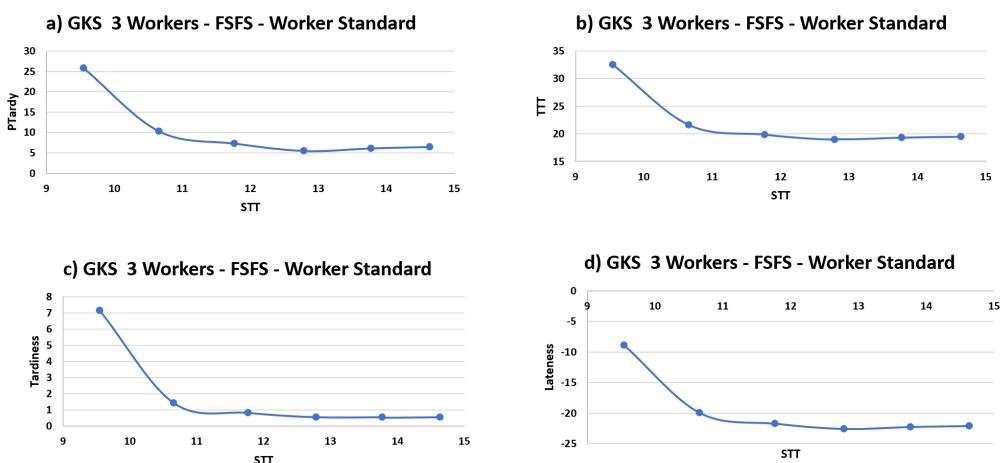
Por conseguinte, foram simulados vários cenários onde se alterou o número de *kanbans* disponíveis para a linha de produção. Recorreu-se a uma análise dos valores das medidas de desempenho PTardy, TTT, Lateness e Tardiness, de maneira a alcançar o número de *kankans* que minimizasse as mesmas. Adicionalmente, um tempo elevado desta medida poderá representar elevados níveis de *stock* e, por consequência, mais custos relacionados com o mau desempenho desta medida. Assim sendo, foram elaborados vários gráficos ajustados, que permitem visualizar um possível ponto que minimiza a curva nas diferentes medidas de desempenho.

### 6.1 Modelo GKS com movimentação *Standard* e regra de despacho FSFS

#### 6.1.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo GKS, com a regra de despacho FSFS, contendo três trabalhadores estão presentes na figura 6.1. Os gráficos ajustados expostos, contêm 6 pontos, referentes a 5, a 6, a 7, a 8, a 9 e 10 *kanbans*. O tempo de percurso do trabalho, para os pontos em análise, varia entre 9 e 15 horas.

Uma vez que o objetivo cinge-se em minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem comprometer as medidas de desempenho, PTardy, TTT, Lateness, Tardiness, após a análise dos gráficos a), b), c) e d) da figura 6.1, conclui-se que o possível melhor cenário para estas, seria o que corresponde a 6 *kanbans*, apresentando 10.65 horas de tempo de processamento de um trabalho.



**Figura 6.1:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

#### 6.1.2 Cinco Trabalhadores

Para este modelo, a característica diferenciadora em relação ao anteriormente apresentado, é o número de trabalhadores, passando este para cinco.,

Os gráficos apresentados na figura 6.2, apresentam oito pontos que permitem projetar o ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Estes pontos representam 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25

kanbans. O STT varia entre 19 e 22 horas, de acordo com os gráficos a), b), c) e d) apresentados na figura 5.6. Desta forma, conclui-se que, o possível melhor cenário seria o de 23 *kanbans*, correspondendo a 21.28 horas de tempo de processamento do trabalho, tratando-se do sexto ponto nos gráficos apresentados na figura.

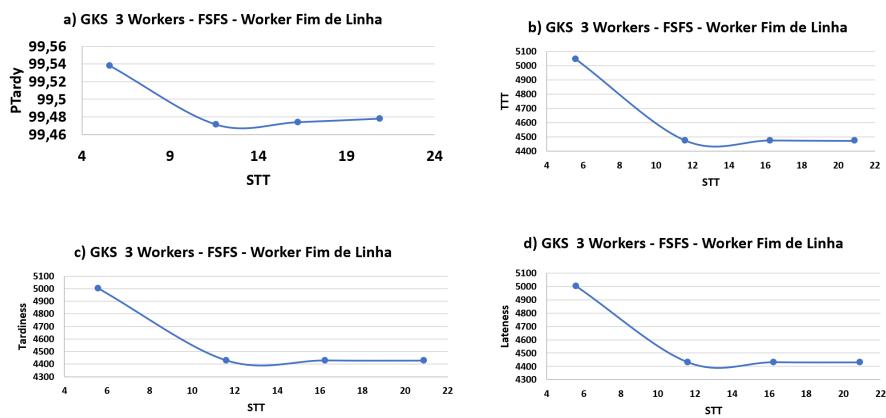


**Figura 6.2:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 6.2 Modelo GKS com movimentação AFL e regra de despacho FSFS

### 6.2.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo GKS com a regra de despacho FSFS, com três trabalhadores estão presentes na figura 6.3. São apontados gráficos ajustados com 4 pontos, relativos a 2, 3 e 4 *kanbans*. O tempo de percurso do trabalho, para estes pontos analisados, varia entre 5 e 20 horas. Com o pressuposto em minimizar os tempos de percurso médios, após a análise dos gráficos a), b), c) e d) da figura 6.3, determinou-se que o possível melhor cenário, considerando todas as medidas de desempenho calculadas, seria o ponto que corresponde a 2 *kanbans*, apresentando 11.59 horas de tempo de processamento de um trabalho.

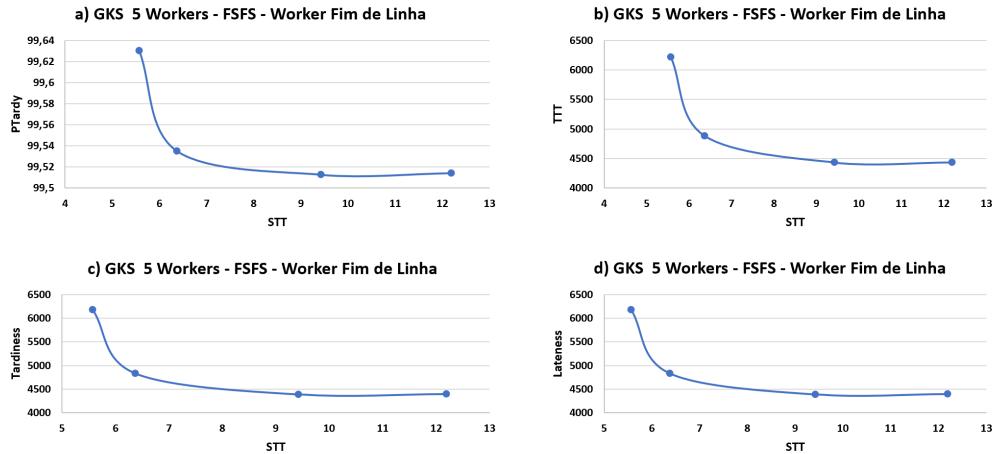


**Figura 6.3:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 6.2.2 Cinco Trabalhadores

Os resultados para este modelo, nos quais a característica diferenciadora é o número de trabalhadores, aumentando estes para cinco, estão expostos na figura 6.4. Apresentam, por conseguinte, apenas quatro pontos que permitem inferir o ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado até à sua conclusão. Estes ostentam valores de 1, 2, 3 e 4 cartões.

De acordo com a figura, medida do STT varia entre 5 e 12 horas. Por consequência, conclui-se que o possível melhor cenário teria 2 *kanbans*, correspondendo a 6.37 horas de tempo de processamento do trabalho, tratando-se do segundo ponto nos gráficos apresentados na figura 6.4.



**Figura 6.4:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho FSFS. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 6.3 Modelo GKS com movimentação *Standard* e regra de despacho MODD

### 6.3.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo GKS, com a regra de despacho MODD, contendo três trabalhadores na linha de produção, encontram-se na figura 6.5. Expõem-se os gráficos ajustados com 5 pontos, com 6, 7, 8, 9, 10 *kanbans*, respectivamente.

Assim, o tempo de percurso do trabalho, para estes pontos analisados, varia aproximadamente, entre 10 e 15 horas.

Com vista em minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem comprometer as medidas de desempenho, PTardy, TTT, Lateness, Tardiness, após a análise dos gráficos a), b), c) e d) da figura 6.5, conclui-se que o possível melhor cenário teria 7 *kanbans*, apresentando 11.72 horas de tempo de processamento de cada trabalho.



**Figura 6.5:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

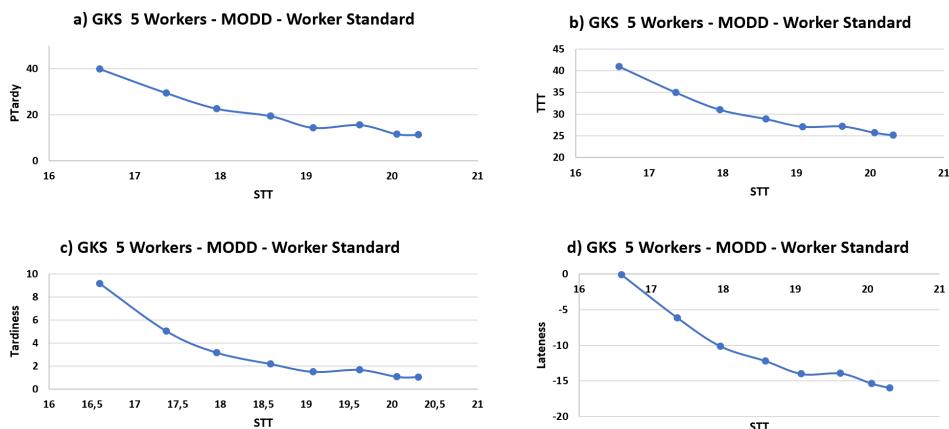
### 6.3.2 Cinco Trabalhadores

No presente modelo, a característica que o diferencia do anterior, é o número de trabalhadores, passando este para cinco.

Os gráficos apresentados na figura 6.6, apresentam os oito pontos que denotam o que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado, até à sua conclusão. Estes pontos apontam os valores de 14, de 15, de 16, de 17, de 18, de 19, de 20 e de 21 kanbans.

De acordo com o exibido na figura, o STT varia entre 16.5 e 20.5 horas.

Após o estudo dos gráficos a), b), c) e d) apresentados, constatou-se que o possível melhor cenário teria 16 *kanbans*, correspondendo aproximadamente, a 18 horas de tempo de processamento do trabalho, sendo o terceiro ponto nos gráficos apresentados na figura 5.6.

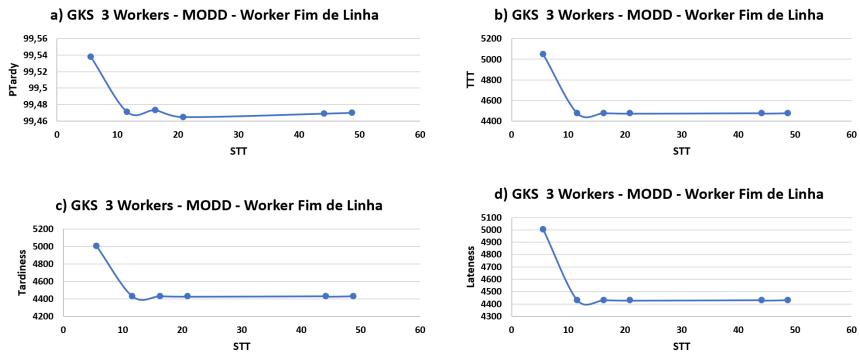


**Figura 6.6:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador *Standard* e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 6.4 Modelo GKS com movimentação AFL e regra de despacho MODD

### 6.4.1 Três Trabalhadores

Os resultados para o modelo GKS, com a regra de despacho MODD, contendo três trabalhadores na linha de produção, são distinguidos na figura 6.7. Os gráficos expostos foram ajustados com 6 pontos, contendo 1, 2, 3, 4, 9 e 10 *kanbans*. O tempo de percurso do trabalho, para estes pontos analisados, varia aproximadamente entre 5 e 49 horas. Como o objetivo é minimizar os tempos de percurso médios de um trabalho, sem lesar as medidas de desempenho, PTardy, TTT, Lateness, Tardiness, após a análise dos gráficos a), b), c) e d), conclui-se que o possível melhor cenário seria composto por 2 *kanbans*, apresentando 11.59 horas de tempo de processamento de um trabalho.



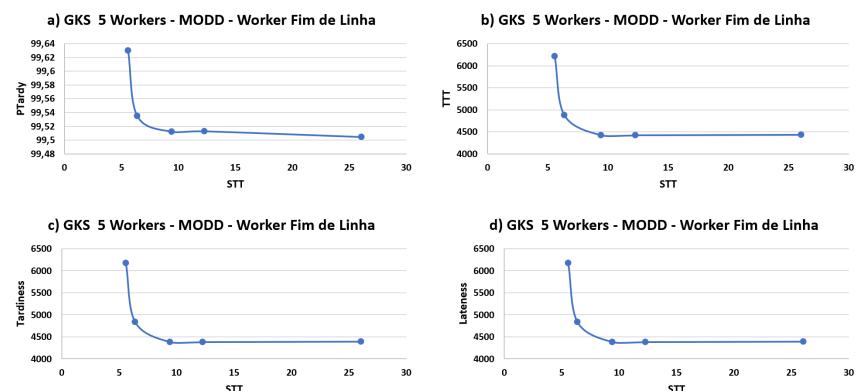
**Figura 6.7:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 3 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

### 6.4.2 Cinco Trabalhadores

Para este modelo, a característica diferenciadora em relação ao anterior, é o número de operadores na fábrica, aumentando-os para cinco.

Os gráficos apresentados na figura 6.8, contêm os cinco pontos que permitem evidenciar o ponto que minimiza o tempo desde que o trabalho é lançado para a fábrica, até à sua conclusão. Estes têm o valor de 1, 2, 3, 4 e 9 *kanbans*.

De acordo com o exposto nos ráticos, a medida do STT varia entre 5 e 26 horas. Constatou-se ainda que, o possível melhor cenário teria 2 *kanbans*, correspondendo aproximadamente a 6.5 horas de processamento do trabalho, tratando-se do segundo ponto nos gráficos apresentados na figura 6.8.



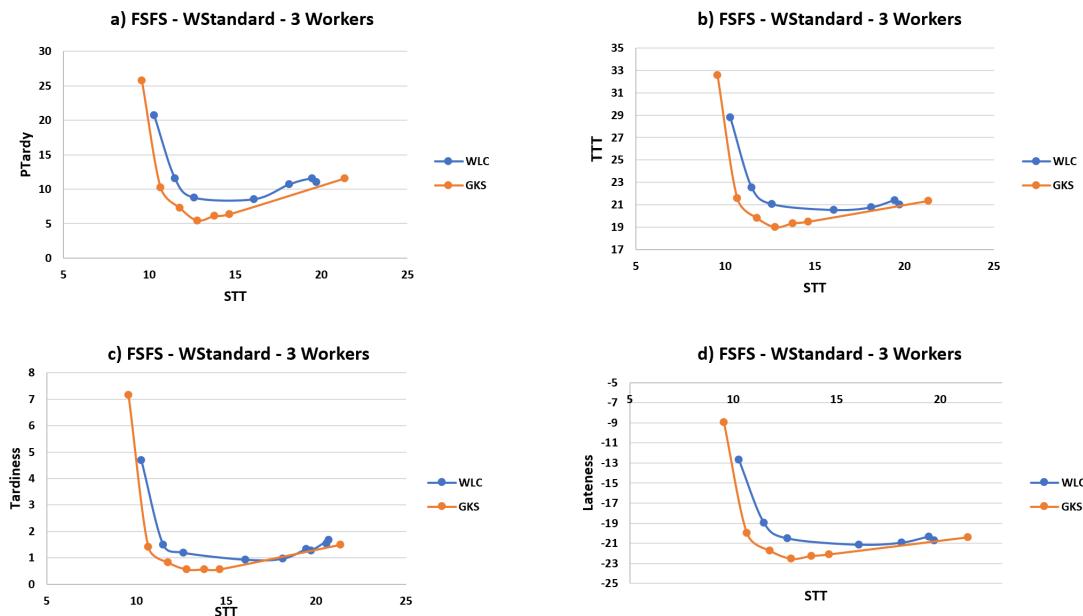
**Figura 6.8:** Avaliação das medidas de desempenho no modelo GKS de 5 trabalhadores com movimentação do trabalhador AFL e com a regra de despacho MODD. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

## 7. Comparação dos modelos WLC vs GKS

Calculando as curvas de desempenho, é possível analisar as diferenças de comportamento entre os dois mecanismos em estudo.

Desta forma, foram elaborados vários gráficos que colocam os dois mecanismos em confronto e comparam as diferentes medidas de desempenho, de forma a tornar possível identificar qual o que apresenta melhor atividade produtiva, face não só às regras de despacho, como também às movimentações dos trabalhadores utilizadas.

### 7.1 Regra de despacho FSFS e Movimentação do trabalhador Standard - 3 trabalhadores

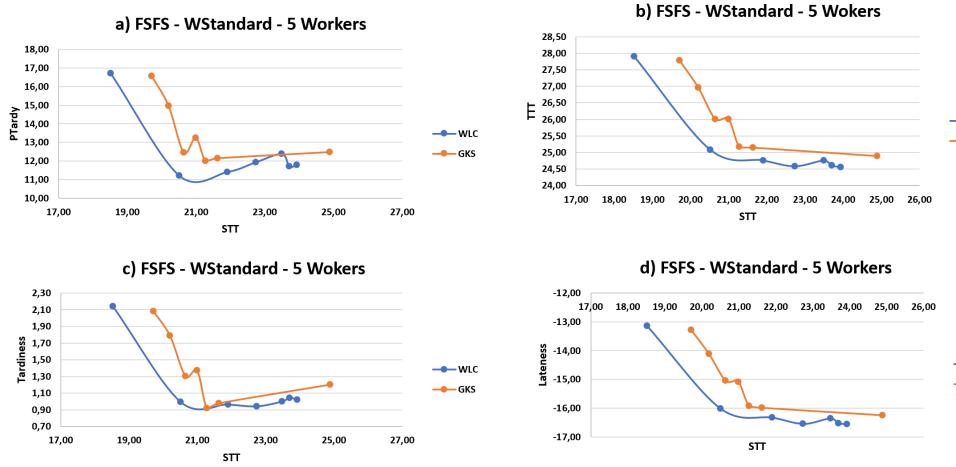


**Figura 7.1:** Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador Standard. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

Na figura 7.1, são apresentados os resultados relativos à comparação dos mecanismos do CAP abordados ao longo deste documento. Estes, são referentes à regra de despacho FSFS, na qual o primeiro trabalho a entrar nas filas de espera de cada estação, é o primeiro a ser processado e, perante uma movimentação do trabalhador do tipo *Standard*, na qual é atribuída uma lista de tarefas com a informação da estação para onde este tem de se dirigir para executar um trabalho, sendo que este se movimenta para a primeira que o solicitou. Nesta comparação, feita com 3 trabalhadores, observa-se que o GKS apresenta resultados melhores quando comparados com os do WLC, uma vez que a curva destacada para o primeiro mecanismo está localizada abaixo da curva do mecanismo WLC. Como se pode comprovar através dos gráficos a), b), c) e d), a curva referente ao mecanismo GKS contém os valores mais baixos, isto é, minimiza em a), o PTardy, em b), o TTT, em c), o Tardiness e, por fim, em d), o Lateness.

## 7.2 Regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador Standard - 5 trabalhadores

A figura 7.2 ostenta a comparação dos modelos, respeitando as mesmas regras de despacho e de movimentação do trabalhador mencionadas acima, apenas diferindo no número de trabalhadores, passando este para cinco, ao invés de três.

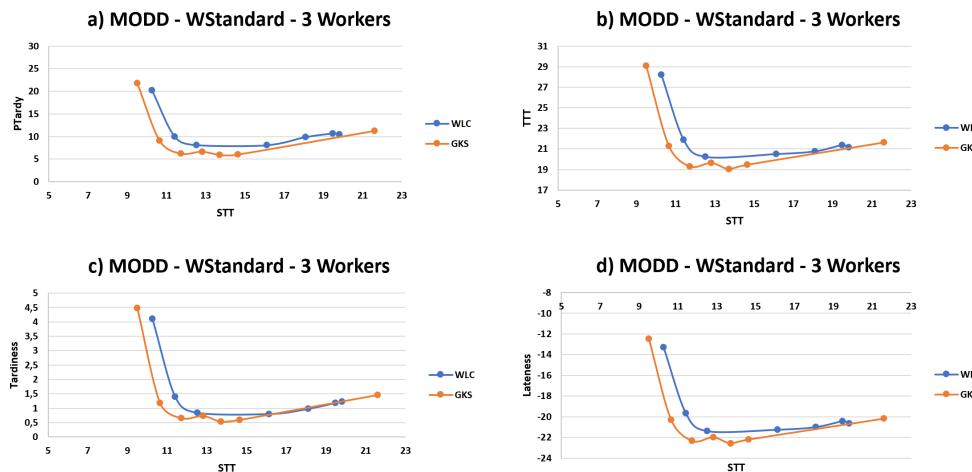


**Figura 7.2:** Comparação dos modelos WLC e GKS de 5 trabalhadores segundo a regra de despacho FSFS e movimentação do trabalhador Standard. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

Como se verifica no gráfico a), a curva que caracteriza o modelo WLC, supera a do GKS, uma vez que se localiza abaixo da segunda. O mesmo se verifica para as restantes medidas de desempenho, fazendo do mecanismo WLC, com o ambiente composto pelas características apresentadas, aquele que apresenta melhor desempenho produtivo.

## 7.3 Regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador Standard - 3 trabalhadores

Na figura 7.3, são apresentados os resultados da comparação dos mecanismos WLC e GKS, utilizando a regra de despacho MODD e perante uma movimentação do trabalhador do tipo *standard*. Esta comparação foi feita para 3 trabalhadores.



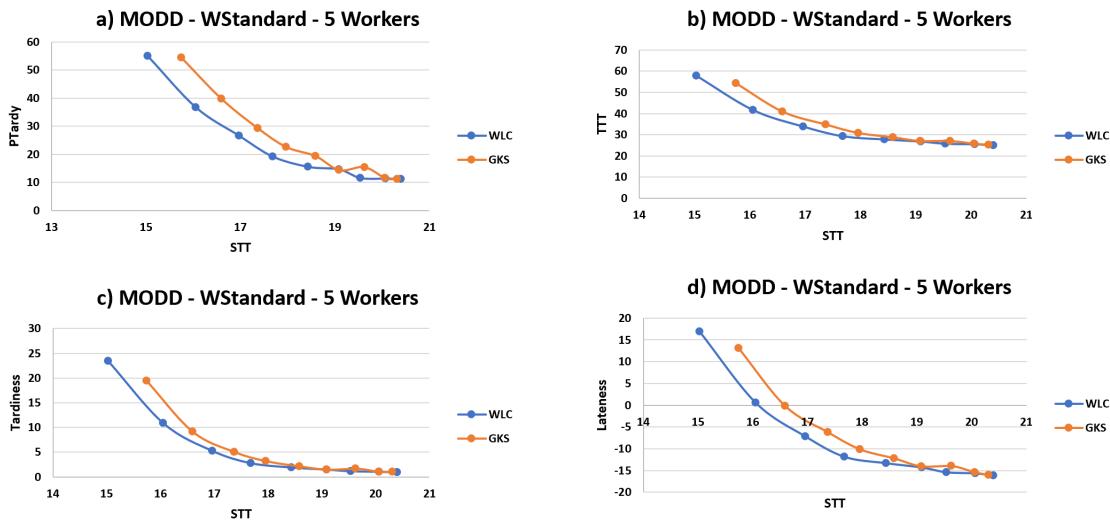
**Figura 7.3:** Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador Standard. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

Como se observa na figura 7.3, o mecanismo GKS apresenta resultados mais satisfatórios, quando comparados com os do mecanismo WLC. Como se pode verificar, nos gráficos a), b), c) e d), a curva referente ao mecanismo GKS contém sempre valores inferiores à curva do mecanismo WLC, o que induz numa minimização em a), da

medida do PTardy, em b), da medida do TTT, em c), da medida do *Tardiness* e, por fim, em d), da medida do *Lateness*.

## 7.4 Regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador *Standard* - 5 trabalhadores

A figura 7.4 compara os modelos WLC e GKS, respeitando as mesmas regras de despacho e de movimentação do operário mencionadas anteriormente, aumentando o número de trabalhadores para cinco, ao invés da primeira análise feita.

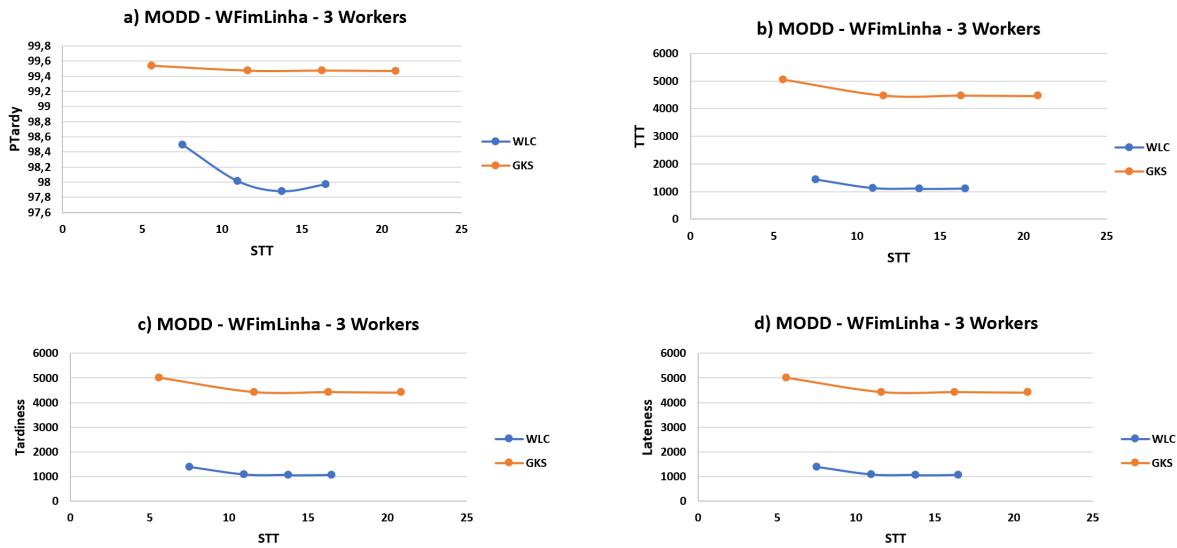


**Figura 7.4:** Comparação dos modelos WLC e GKS de 5 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador *Standard*. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o *Tardiness* e o d) avalia o *Lateness*

De acordo com a análise da figura 7.4, verifica-se que a curva que caracteriza o modelo WLC, encontra-se numa posição inferior nos quatro gráficos apresentados, quando comparada com a do GKS, o que incorre num melhor desempenho de todas as medidas em análise. Do estudo efetuado, conclui-se que, quando se trata da movimentação do operário de tipo standard, isto é, quando os cinco trabalhadores se dirigem para onde foram solicitados, os resultados são visivelmente melhores, para o mecanismo que utiliza *kanbans*. Por outro lado, quando se trata de três trabalhadores, o mecanismo do controlo da carga é, claramente aquele que apresenta melhor desempenho.

## 7.5 Regra de despacho MODD e Movimentação do trabalhador Acompanhamento Fim de linha - 3 trabalhadores

Por fim, foram comparados os dois mecanismos consoante as duas regras de despacho estabelecidas, mas desta vez com a movimentação do trabalhador que acompanha o trabalho até ao fim da linha de produção. Foram analisados para 3 e para 5 trabalhadores.



**Figura 7.5:** Comparação dos modelos WLC e GKS de 3 trabalhadores segundo a regra de despacho MODD e movimentação do trabalhador Acompanhamento Fim de linha. O gráfico a) avalia o PTardy, o b) avalia o TTT, o c) avalia o Tardiness e o d) avalia o Lateness

Da análise da figura 7.5, retira-se que o mecanismo GKS, apresenta claramente melhor desempenho produtivo, uma vez que, contém valores inferiores em todas medidas de desempenho, em comparação com o mecanismo WLC. Em seguimento, perante qualquer uma das duas regras de despacho e, quer o número de trabalhadores seja três ou cinco, a comparação entre estes dois mecanismos, com a movimentação do trabalhador até ao fim da linha de produção, foram muito semelhantes entre si.

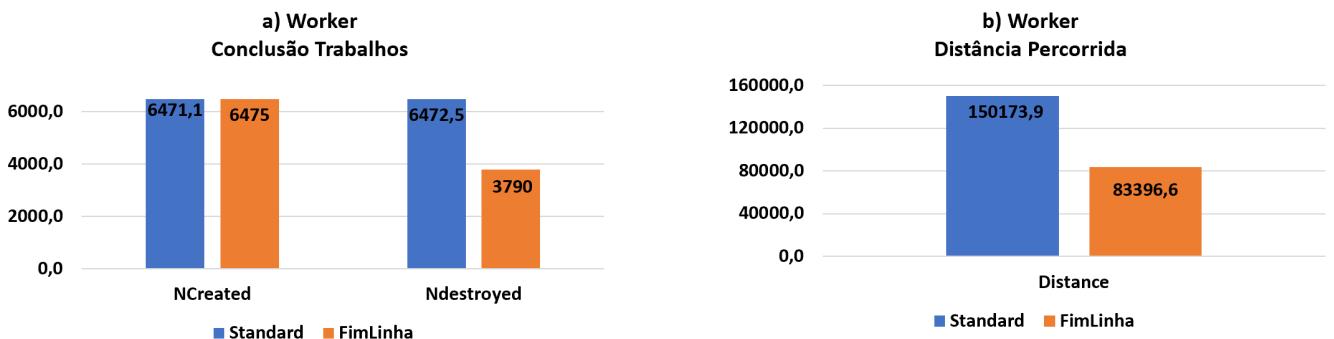
O exemplo apresentado, explicita de forma muito clara, o comportamento observado em todos os modelos em que o operador acompanha o trabalho do início ao fim da linha de fabrico. Pela razão mencionada, é apenas exposto um exemplo dos modelos em que o *worker* acompanha os trabalhos ao longo da linha de produção.

Da análise efetuada, foi possível averiguar que o número de horas utilizadas no mecanismo WLC, foi bastante reduzido, incorrendo num número reduzido de trabalhos na linha de produção. Dessa forma, os operandos fabris do mecanismo mencionado, trabalham menos horas por este apresentar um número inferior de trabalhos em curso. Em consequência, o mecanismo WLC apresenta, como mostra o gráfico b), melhores resultados de TTT, quando comparado com o mecanismo GKS. Por outro lado, no mecanismo GKS, os trabalhadores encontram-se mais ocupados, o que resulta num aumento do número de trabalhos lançados no espaço fabril, o que explica os valores elevados de trabalhos em atraso observados em a).

## 8. Regras de movimentação: *Standard* vs AFL

Para tornar o estudo efetuado mais completo, realizou-se, adicionalmente uma análise que coloca em confronto as duas regras de movimentação abordadas durante o presente projeto. Tal como observado em a), perante a regra *Standard*, o número de entidades criadas no sistema é praticamente o mesmo número de entidades destruídas, isto significa que aparentemente, seguindo a regra de movimentação do trabalhador *Standard*, os trabalhos lançados na linha de produção são concluídos com sucesso, dentro do prazo estabelecido. Em contrapartida, o mesmo não se pode afirmar, quando é analisada a movimentação do trabalhador AFL, uma vez que o número de entidades destruídas é sensivelmente metade do número de entidades criadas. Este resultado pode ser explicado pelo facto da movimentação do trabalhador de início a fim de linha, trazer como consequência um acumular de trabalhos na primeira máquina, fazendo com que os trabalhadores se encontrem permanentemente ocupados e incapazes de satisfazer as necessidades pretendidas.

Analizando o gráfico evidenciado em b), a distância percorrida, em metros, dos trabalhadores mediante regra *Standard* e AFL, observa-se que um operador fabril que acompanha os trabalhos de estação em estação, isto é, que acompanha os trabalhos até ao fim de linha de produção, percorre uma distância inferior à de um trabalhador que se dirige para a estação que vai solicitando. Estas conclusões foram retiradas de acordo com o observado na figura 8.1.

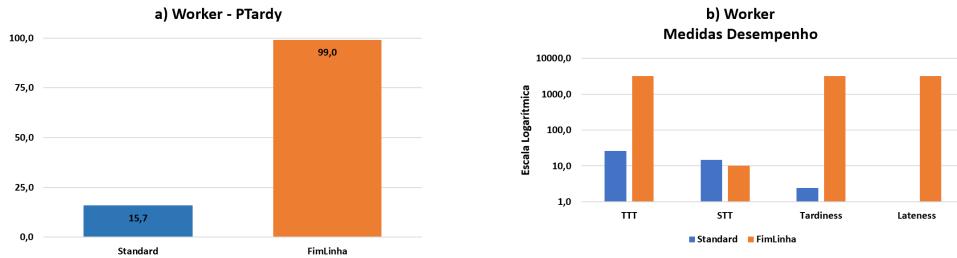


**Figura 8.1:** Comparação das regras de movimentação para conclusão dos trabalhos e para distância percorrida. O gráfico a) avalia a conclusão dos trabalhos e o gráfico b) avalia a distância percorrida pelo trabalhador

Em seguimento do caso em estudo, considerou-se importante analisar a percentagem de trabalhos em atraso, pois esta medida é bastante importante para classificar o desempenho de qualquer organização.

Da análise feita em a), da figura 8.2, verifica-se que cerca de 99% dos trabalhos são entregues em atraso, colocando a regra de movimentação *Standard* em vantagem com apenas 15,7% dos mesmos. A diferença apresentada entre os dois métodos de movimentação, deve-se ao facto dos trabalhadores terem de acompanhar todos os trabalhos desde o início da produção, até ao fim da linha. Posto isto, verifica-se um número elevado de trabalhos acumulados na fila de espera do primeiro CT, aguardando que um operário acabe de concluir o trabalho na sexta máquina e possa iniciar o processamento de um novo trabalho.

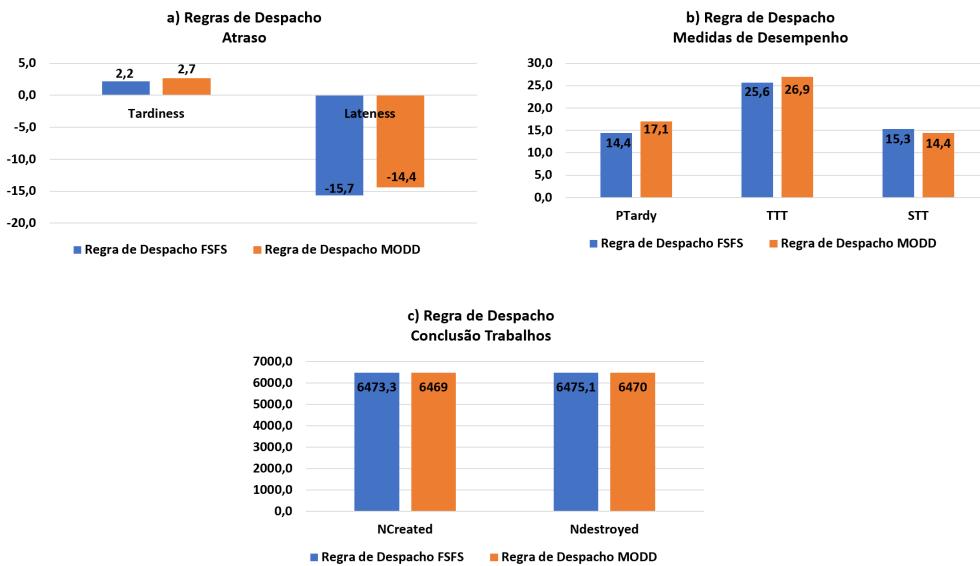
Em b), foram comparadas as medidas de desempenho TTT, STT, *Tardiness* e *Lateness*. Os resultados demonstram que a regra de movimentação *Standard* apresenta melhores resultados relativamente a regra AFL, exceção feita à medida de STT. No entanto, realça-se que esta diferença é mínima, considerando-se assim, que com a movimentação do *worker Standard*, obtém-se resultados mais satisfatórios.



**Figura 8.2:** Comparação das regras de movimentação para percentagem de trabalhos em atraso e para medidas de desempenho. O gráfico a) avalia o PTardy e o gráfico b) avalia várias medidas de desempenho, TTT, STT, *Tardiness* e *Lateness*

Foi ainda considerado o estudo das regras de despacho. Para tal, observou-se o comportamento das várias medidas de desempenho, com o intuito de avaliar aquela que apresentava melhor desempenho produtivo e, consequentemente, mais vantajosa para a estação fabril. Posto isto, analisaram-se o número de trabalhos em atraso, relativamente à conclusão dos mesmos, presente na figura 8.3.

Da análise do gráfico a), retira-se que os valores do atraso isto é, do *Tardiness* e do *Lateness*, são semelhantes, não sendo possível concluir qual a melhor regra de despacho. Relativamente à análise feita em b), que engloba três medidas de desempenho, embora também bastante semelhante, a regra de despacho MODD, apresenta um valor cerca de 2.7% maior de trabalhos em atraso, sendo portanto, pior, quando confrontada com a regra FSFS. Por fim, em c), verifica-se que ambas as regras de despacho concluem os trabalhos lançados na linha de produção. Assim, conclui-se que as regras de despacho não influenciam a conclusão dos trabalhos.



**Figura 8.3:** Comparação das regras de despacho para atraso dos trabalhos, medidas de desempenho e para conclusão dos trabalhos. O gráfico a) avalia o atraso na conclusão dos trabalhos, o gráfico b) avalia o PTardy, o TTT e o STT e o gráfico c) avalia a conclusão dos trabalhos

## 9. Conclusões e trabalho futuro

Com o intuito de estabelecer o modo operatório de um espaço fabril e de avaliar o desempenho produtivo do mesmo, foi elaborado o trabalho prático que conjuga duas unidades curriculares lecionadas no primeiro semestre do presente ano letivo. As duas disciplinas complementam-se de tal forma que, permitiram a elaboração de vários modelos de simulação que evidenciam a forma como dois mecanismos de CAP se comportam. Foi proposto não só o estudo aprofundado desses mecanismos a nível teórico, como também o conhecimento e desenvolvimento, num ambiente simulado, o funcionamento de ambos.

Foram definidas várias etapas para avaliar estes mecanismos. Inicialmente, foi elaborado um estudo dos conteúdos teóricos que estão na base dos mecanismos WLC e GKS. Esse estudo permitiu assim, transitar para uma segunda etapa, a modelação desses mecanismos no *software SIMIO*. Foi necessário definir toda a configuração do sistema produtivo, considerando o intervalo entre a chegada dos trabalhos, até à regra de sequenciação na *pool*. Estas escolhas foram feitas tendo por base o conselho dos docentes responsáveis.

No seguimento do trabalho desenvolvido e, após estar concluída a etapa que definiu os modelos de simulação, seguiu-se a fase experimental.

No confronto entre os mecanismos em estudo, sendo estes o WLC e o GKS, foi possível verificar que com a movimentação do trabalhador do tipo *Standard*, contendo três trabalhadores na linha de produção, o GKS apresentou resultados superiores, quando comparado com o mecanismo WLC. Relativamente aos modelos com cinco trabalhadores na linha de produção, o WLC apresentou resultados superiores aos do mecanismo GKS. Desta forma, conclui-se que o mecanismo GKS, com um número relativamente pequeno de trabalhadores, funciona melhor, relativamente ao mecanismo WLC.

De igual forma, as regras de movimentação do operário, demonstraram ter influência no desempenho dos mecanismos. Em todos os cenários onde os trabalhadores acompanham, até ao fim da linha de produção, o trabalho, o WLC apresentou resultados significativamente superiores ao GKS. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto dos trabalhos se concentrarem no primeiro CT, a aguardar que um dos trabalhadores fique livre. Deste modo, estes permanecerem mais ocupados, enquanto os trabalhos se acumulam. Considera-se assim, que os modelos baseados na movimentação do trabalhador AFL são menos eficientes, comparativamente com o operário que se movimenta de acordo com a regra *Standard*.

Como trabalho futuro, sugere-se que seja determinado o intervalo de chegadas ideal para movimentação do trabalhador AFL, com o intuito de se obter uma percentagem de utilização deste, mais adequada. Poder-se-á testar os modelos considerando mais trabalhadores. Poderá ser também estudada a hipótese de se efetuarem experiências com um número maior de replicações, a título de exemplo, trezentas. Tal conjectura é sugerida de forma a tornar o modelo com curvas de desempenho mais estáveis, a fim de aumentar a confiança no modelo e nos seus resultados.

# Bibliografia

- Bergamaschi, D., C. R. P. M. . P. A. (1997). Order review and release strategies in a job shop environment: A review and a classification. *International Journal of Production Research*, 32(2):399–420.
- Bertrand, J. W. M., . W. J. C. (1981). Production control and information systems for component-manufacturing shops. *Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam*.
- Boxuan Zhao, Jianmin Gao, K. C. and Xu, A. (2015). Workload control-related workload route decision. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3):1422–1427.
- C. Silva, V. Reis, A. M. I. B. J. V. T. P. M. N. M. H. M. L. V. G. P. L. D. N. O. F. and Carmo-Silva, S. (2017). A comparison of production control systems in a flexible flow shop. *Procedia Manufacturing*, 13:1090–1095.
- Carmo-Silva, S. (2015). Textos de gestão da produção (rev 04-2015).
- Chang, T.-M. and Yih, Y. (1994). Generic kanban systems for dynamic environments.
- Dehghanimohammabadi, M. and Keyser, T. K. (2017). Intelligent simulation: Integration of simio and matlab to deploy decision support systems to simulation environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 71:45–60.
- Fernandes, N. O. and Carmo-Silva, S. (2011). Workload control under continuous order release. *International Journal of Production Economics*, 131:257–262.
- J. Schaefers, M. B. and Colin, J. (2000). A generic kanban based push-pull schedule in a job shop. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(17):585–590.
- Junior, M. L. and Filho, M. G. (2010). Variations of the kanban system: Literature review and classification. *International Journal of Production Economics*, 125(1):13–21.
- Land, M. J., . G. G. J. (1998). The performance of workload control concepts in job shops: improving the release method. *International Journal of Production Economics*, 56:347–364.
- Lawrence D.Fredendall, D. O. and Patterson, W. (2010). Concerning the theory of workload control. *European Journal of Operational Research*, 201(1):99–111.
- Mortágua, J. P. C. (2014). Estudo de mecanismos de controlo da atividade produtiva baseados em cartões na produção por encomenda.
- Oosterman, B., L. M. . G. G. (2000). The influence of shop characteristics on workload control. *International Journal of Production Economics*, 68(1):107–119.
- Sagawa, J. K. and Land, M. J. (2018). Representing workload control of manufacturing systems as a dynamic model. *IFAC-PapersOnLine*, 51(2):825–830.
- Stevenson\*, M., Hendry, L., and †, B. K. (2005). A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research*, 43(5):869–898.
- Varela, M. L. R. (2015). *Controlo da Atividade de Produção*. Publicação Interna do Departamento de Produção e Sistemas, Universidade do Minho.
- Zäpfel, G. and Missbauer, H. (1993). New concepts for production planning and control. *European Journal of Operational Research*, 67(3):297–320.



## A.2 Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador AFL

**Tabela A.2:** Resultados dos modelos WLC e GKS usando a regra FSFS e movimentação do trabalhador AFL

FSFS - WORKER Fim De Linha																	
	Cenário	Repl	Workers	Horas	IntervaloChegadas	UtM1	UtM2	UtM3	UtM4	UtM5	UtM6	Ptardy	TTT	STT	Tardiness	Lateness	UtWorker
WLC	1	100	3	1	Random.Exponential(2.05)	65,0093	37,1528	37,1854	37,1545	37,1243	37,099	98,4492	1425,93	7,53366	1384,96	1384,96	86,9716
	2	100	3	2	Random.Exponential(2.05)	96,7143	38,7457	38,6696	38,6281	38,6774	38,6051	98,0737	1164,37	11,0782	1123,36	1123,36	95,8727
	3	100	3	3	Random.Exponential(2.05)	99,673	38,6612	38,5659	38,7122	38,6651	38,6202	97,9865	1171,87	14,0378	1131	1131	96,1785
	4	100	3	4	Random.Exponential(2.05)	99,9813	38,7414	38,6549	38,671	38,6728	38,6465	98,1729	1164,24	16,9318	1123,1	1123,1	96,2397
	5	100	3	9	Random.Exponential(2.05)	100	38,6717	38,5755	38,6876	38,5979	38,6488	98,1666	1164,0	30,2529	1123,27	1123,27	96,1937
	6	100	3	10	Random.Exponential(2.05)	100	38,6559	38,638	38,6563	38,6529	38,6298	98,035	1156,32	32,8898	1115,48	1115,48	96,2178
	7	100	3	1E+09	Random.Exponential(2.05)	100	38,7894	38,5815	38,6862	38,6178	38,6632	98,2311	1168,38	1168,37	1127,6	1127,6	96,2363
	8	100	5	1	Random.Exponential(1.24)	47,0726	43,9965	44,0991	44,0306	44,0478	43,9755	99,3585	3293,81	7,0674	3251,88	3251,88	65,6718
	9	100	5	2	Random.Exponential(1.24)	90,2862	52,0897	52,0069	52,0603	51,9819	52,1594	99,1251	2432,3	10,3409	2391,53	2391,53	91,531
	10	100	5	3	Random.Exponential(1.24)	98,5492	52,2795	52,0383	52,1605	52,1474	52,1696	99,1641	2406,81	12,8463	2365,93	2365,93	93,4627
	11	100	5	4	Random.Exponential(1.24)	99,815	52,2145	52,2597	52,184	52,1844	52,1313	99,1455	2410,02	15,1207	2369,35	2369,35	93,7518
	12	100	5	9	Random.Exponential(1.24)	100	52,0676	52,1438	52,187	52,2861	52,1312	99,1034	2431,98	25,1668	2390,93	2390,93	93,7407
	13	100	5	10	Random.Exponential(1.24)	100	52,1188	52,1091	52,2477	52,2109	52,1154	99,1298	2411,29	27,0838	2370,72	2370,72	93,7206
	14	100	5	1E+09	Random.Exponential(1.24)	100	52,1502	52,2368	52,2072	52,2092	52,1297	99,1197	2406,57	2406,57	2365,81	2365,81	93,7679
GKS	Cenário	Replicações	Workers	Kanbans	IntervaloChegadas	UtM1	UtM2	UtM3	UtM4	UtM5	UtM6	Ptardy	TTT	STT	Tardiness	Lateness	UtWorker
	1	100	3	1	Random.Exponential(2.05)	16,7986	16,6819	16,628	16,5903	16,648	16,6044	99,5379	5048,01	5,57094	5003,8	5003,8	61,0841
	2	100	3	2	Random.Exponential(2.05)	99,9747	19,8841	19,9334	19,9346	19,9633	19,8888	99,4712	4474,71	11,5877	4431,58	4431,58	99,7728
	3	100	3	3	Random.Exponential(2.05)	100	19,8844	19,9335	19,9346	19,9634	19,8883	99,4741	4474,55	16,2361	4431,45	4431,45	99,7792
	4	100	3	4	Random.Exponential(2.05)	100	19,8841	19,9334	19,9347	19,9636	19,8883	99,4778	4474,5	20,8844	4431,44	4431,44	99,7792
	5	100	3	9	Random.Exponential(2.05)	100	19,8842	19,9338	19,9347	19,9633	19,8882	99,4909	4474,47	44,1266	4431,43	4431,43	99,7792
	6	100	3	10	Random.Exponential(2.05)	100	19,8842	19,9336	19,9346	19,9634	19,8884	99,4883	4474,49	48,7742	4431,43	4431,43	99,7792
	7	100	3	1E+09	Random.Exponential(2.05)	100	19,8858	19,9357	19,9345	19,9635	19,8869	99,4773	4474,66	4474,65	4431,52	4431,52	99,7807
	8	100	5	1	Random.Exponential(1.24)	16,7914	16,6473	16,6404	16,6869	16,6161	16,5761	99,6299	6218,17	5,5714	6176,26	6176,26	36,6643
	9	100	5	2	Random.Exponential(1.24)	29,3731	29,059	29,0913	29,1775	29,0231	29,009	99,535	4878,61	6,37244	4835,66	4835,66	72,4704
	10	100	5	3	Random.Exponential(1.24)	99,9618	33,3289	33,4036	33,3436	33,4452	33,2708	99,5127	4431,3	9,42109	4389,38	4389,38	97,3846
	11	100	5	4	Random.Exponential(1.24)	100	33,341	33,4038	33,3134	33,3994	33,3078	99,5143	4436,54	12,1904	4394,68	4394,68	97,3877
	12	100	5	9	Random.Exponential(1.24)	100	33,3356	33,3958	33,4103	33,3824	33,2848	99,5282	4433,22	26,0713	4392,04	4392,04	97,3928
	13	100	5	10	Random.Exponential(1.24)	100	33,3348	33,3814	33,3198	33,4277	33,321	99,5347	4435,34	28,8538	4393,88	4393,88	97,3917
	14	100	5	1E+09	Random.Exponential(1.24)	100	33,3442	33,4241	33,3454	33,4347	33,3525	99,5117	4429,39	4429,39	4387,89	4387,89	97,3988





## A.6 Resultados com a comparação das movimentações do trabalhador *standard* e AFL

**Tabela A.6:** Resultados com a comparação das movimentações do trabalhador *standard* e AFL

	Worker	
	Standard	FimLinha
PTardy	15,7	99,0
TTT	26,3	3216,6
STT	14,9	10,1
Tardiness	2,4	3174,8
Lateness	-15,0	3174,8
NCreated	6471,1	6475
Ndestroyed	6472,5	3790
Distance	150173,9	83396,6

## A.7 Resultados com a comparação das regras de despacho FSFS e MODD

**Tabela A.7:** Resultados com a comparação das regras de despacho FSFS e MODD

	Regra de Despacho	
	FSFS	MODD
PTardy	14,4	17,1
TTT	25,6	26,9
STT	15,3	14,4
Tardiness	2,2	2,7
Lateness	-15,7	-14,4
NCreated	6473,3	6469
Ndestroyed	6475,1	6470
Distance	149491,5	150856,4