



Universidade do Minho
Departamento Produção e Sistemas

DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO DE SISTEMAS
Mestrado em Engenharia de Sistemas
Gestão da Produção

Escalonamento da Produção



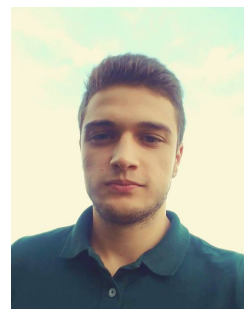
Célia Figueiredo
a67637



Margarida Rolim
pg38332



Márcia Costa
a67672



Daniel Oliveira
Sousa pg37112

Docente: Maria Leonilde Rocha Varela

Braga, 7 de Janeiro de 2019

Conteúdo

1	Introdução	5
1.1	Organização do documento	6
2	Descrição geral do projeto	7
3	Ambiente em Linha de produção Flexível (<i>Flexible Flow Shop</i>-FFS)	8
3.1	Regra de SPT	8
3.1.1	Resultados obtidos com a regra SPT	8
3.2	Método MS	9
3.2.1	Resultados obtidos com o método MS	9
3.3	Heurística <i>General SB Routine</i>	10
3.3.1	Resultados obtidos com a heurística <i>General SB Routine</i>	10
4	Ambiente em oficina flexível (<i>Flexible Job Shop</i> - FJS)	11
4.1	Regra LPT	11
4.1.1	Resultados obtidos com o método LPT	11
4.2	Regra EDD	12
4.2.1	Resultados obtidos com o método EDD	12
4.3	Heurística <i>General SB Routine</i>	13
4.3.1	Resultados obtidos com a heurística <i>General SB Routine</i>	13
5	Métodos/Abordagens de escalonamento da produção alternativos	14
5.1	<i>Flexible Flow Shop</i>	14
5.1.1	Regra WSPT	14
5.1.2	Regra FCFS	14
5.2	<i>Flexible Job Shop</i>	16
5.2.1	Regra CR	16
5.2.2	Regra ATCS	16
6	Discussão dos Resultados	18
6.1	<i>Flexible Flow Shop</i>	18
6.2	<i>Flexible Job Shop</i>	18
7	Conclusões	20

Lista de Figuras

1.1	Linha de Produção Geral Flexível	5
1.2	Oficina de Produção Geral Flexível	5
3.1	Diagrama de Gantt para a regra SPT	8
3.2	Diagrama de Gantt para o método MS	9
3.3	Diagrama de Gantt para <i>General SB Routine</i>	10
4.1	Diagrama de Gantt para o método LPT	11
4.2	Diagrama de Gantt para o método EDD	12
4.3	Diagrama de Gantt para a Heurística <i>General SB Routine</i>	13
5.1	Resultados obtidos para os diferentes métodos incluindo o metodo WSPT e FCFS	14
5.2	Gráfico de barras do tempo total de produção (Cmax) obtido para cada algoritmo usado . .	15
5.3	Gráfico de barras do atraso máximo (Tmax) obtido para cada algoritmo usado	15
5.4	Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado	15
5.5	Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado	15
5.6	Gráfico de barras do número de lotes atrasados obtido para cada algoritmo usado	15
5.7	Resultados obtidos para os diferentes métodos incluindo o metodo CR e ATCS	16
5.8	Gráfico de barras do tempo total de produção (Cmax) obtido para cada algoritmo usado . .	17
5.9	Gráfico de barras do atraso máximo (Tmax) obtido para cada algoritmo usado	17
5.10	Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado	17
5.11	Gráfico de barras do atraso total obtido para cada algoritmo usado	17
5.12	Gráfico de barras do número de lotes atrasados obtido para cada algoritmo usado	17
6.1	Gráfico de resultados para linhas de produção flexíveis	18
6.2	Gráfico de resultados para oficinas flexíveis	19

Lista de Tabelas

2.1	Tempos de processamento de duas operações (pj1 e pj2) de 9 lotes de trabalhos e os correspondentes prazos de conclusão (dj)	7
3.1	Resultados obtidos para a regra SPT nas diferentes medidas de desempenho	9
3.2	Resultados obtidos para o método MS	10
3.3	Resultados obtidos para a Heurística <i>General SB Routine</i> com diferentes medidas de desempenho	10
4.1	Resultados obtidos para o método LPT	12
4.2	Resultados obtidos para o método EDD	12
4.3	Resultados obtidos para Heurística <i>General SB Routine</i>	13
6.1	Resultados obtidos para os diferentes métodos e medidas de desempenho	18
6.2	Resultados obtidos para os diferentes métodos e medidas de desempenho	19

Lista de siglas

ATC Apparent Tardiness Cost

ATCS Apparent Tardiness Cost with Setups

CR Critical Ratio Rule

EDD Earliest Due Date

FCFS First Come First Served

FJS Flexible Job Shop

FFS Flexible Flow Shop

GSBR General Shifting Bottleneck Routine

LPT Longest Processing Time

MS Minimum Slack

SPT Shortest Processing Time

WSPT Weighted Shortest Processing Time

1. Introdução

O escalonamento é um processo de tomada de decisão que é usado em muitas indústrias. Desempenha uma papel importante na maioria dos sistemas de produção, bem como na maioria dos ambientes de processamento de informações. É usado para a alocação de recursos a tarefas em determinados períodos de tempo e o objetivo é otimizar um ou mais objetivos. Os recursos podem ser máquinas de uma oficina, pistas de um aeroporto, unidades de processamento em ambiente de computação, etc. As tarefas podem ser as operações num processo de produção, descolagens e aterragens num aeroporto, execuções de programas num computador, etc. Cada tarefa pode ter um certo nível de prioridade, uma data de início de produção adiantada e uma data de vencimento. Um objetivo pode ser a minimização do tempo de conclusão da última tarefa e outro pode ser a minimização do número de tarefas concluídas após os prazos respetivos. (Pinedo (2008))

Numa linha de produção flexível, todos os trabalhos seguem a mesma sequência operatória em relação às máquinas existentes no sistema de produção, como se pode visualizar no esquema da figura 1.1 (Carmo-Silva (2015)). Assim, caso as máquinas sejam dispostas no espaço segundo essa sequência não há fluxos inversos ou regressivos dos trabalhos. Além disso, existem duas ou mais máquinas semelhantes para o processamento de cada operação de um trabalho.

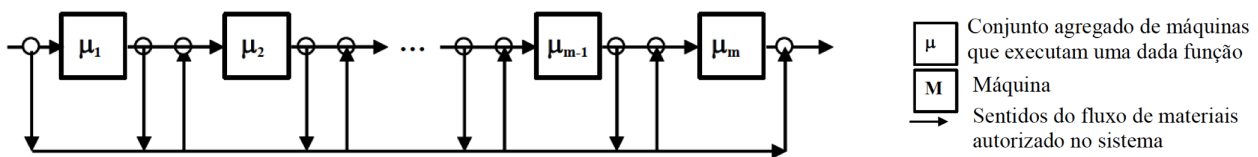


Figura 1.1: Linha de Produção Geral Flexível

Uma oficina de produção flexível é uma oficina geral com processadores alternativos para o processamento. Consequentemente, quando as máquinas estão dispostas no espaço numa dada sequência é de prever a existência de fluxos inversos ou regressivos dos trabalhos no sistema. Além disto, existem também, duas ou mais máquinas semelhantes para o processamento de cada operação de um trabalho. Este tipo de configuração de sistema de produção encontra-se representado na figura 1.2 (Carmo-Silva (2015)).

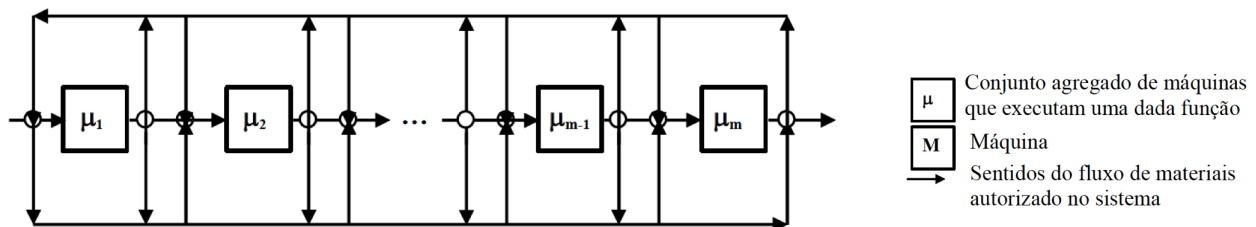


Figura 1.2: Oficina de Produção Geral Flexível

O sistema LEKIN é um *software* de escalonamento e contém vários algoritmos de escalonamento e heurísticas. É capaz de lidar com várias máquinas em diferentes ambientes de produção: máquina única; máquinas paralelas; linhas de produção; linhas de produção flexíveis; oficinas; oficinas flexíveis (Pinedo (2008)).

Os tipos de métodos incluídos no sistema são: regras de despacho, como EDD e WSPT, heurísticas do tipo *shifting bottleneck*, técnicas de pesquisa local, uma heurística para linhas flexíveis para a minimização

do atraso absoluto pesado dos trabalhos (*tardiness*) (Varela (2007)). O sistema permite construir manualmente programas de produção, através de uma interface gráfica, movendo os trabalhos nos diferentes processadores e visualizar as soluções através de diagramas de *Gantt*. Além disso, o sistema também permite guardar e comparar diferentes soluções obtidas pela execução de diferentes métodos ou heurísticas, a fim de poderem ser comparadas. No sentido de fazer o escalonamento, o sistema LEKIN possui um conjunto de oito regras de escalonamento de produção e de heurísticas: ATCS, EDD, MS, LPT, SPT, WSPT, FCFS e CR. Sendo que, as regras EDD e a MS dependem das datas de entrega e lançamento, as regras LPT, SPT e WSPT dependem dos tempos de processamento, enquanto a ATCS e a CR combinam regras.

1.1 Organização do documento

Este documento está dividido em 7 capítulos, o presente apresenta uma breve introdução ao projeto. No segundo é apresentada a descrição do problema. No terceiro serão apresentados os vários métodos do sistema LEKIN para a obtenção de resultados para o ambiente em linha de produção flexível (FFS). No quarto serão apresentados os resultados para o ambiente de produção em oficina flexível (FJS). No quinto serão apresentadas outras abordagens para a resolução dos problemas nos diferentes ambientes. No sexto será feita uma análise de resultados. E por fim serão apresentadas as conclusões.

2. Descrição geral do projeto

Este projeto propõe a resolução de um problema de escalonamento da produção recorrendo a diferentes métodos. Neste problema temos disponíveis 3 máquinas para cada uma das duas fases de produção, ou seja, dispõem de 3 máquinas para a realização de cada uma das operações dos lotes, portanto, um grupo de máquinas $A = \{A1, A2, A3\}$ e um grupo de máquinas $B = \{B1, B2, B3\}$.

Para o cálculo dos valores nas tabelas utilizamos para $d1$ o valor 7 e para $d2$ o valor 2, os valores resultantes do cálculo são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tempos de processamento de duas operações (p_{j1} e p_{j2}) de 9 lotes de trabalhos e os correspondentes prazos de conclusão (d_j)

Lotes j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_{j1}	27	28	21	16	28	23	20	24	17
P_{j2}	18	23	24	26	19	21	20	16	19
d_j	20	15	30	35	25	18	40	37	45

Para o caso do ambiente de produção em forma de FJS, considerou-se que a partir do lote 5, inclusive, os lotes realizam as operações por ordem inversa do fluxo normal de produção verificado na configuração FFS, ou seja, que os lotes 5, 6, 7, 8 e 9 realizam primeiro (a sua primeira fase de produção ou operação) nas máquinas do grupo B e depois a sua segunda fase de produção (ou operação) no grupo de máquinas A, respetivamente.

Nos próximos dois capítulos serão apresentados os métodos para a resolução deste problema, assim como os resultados obtidos.

3. Ambiente em Linha de produção Flexível (*Flexible Flow Shop*-FFS)

Uma linha de produção flexível é uma generalização de linha de produção e ambientes em máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série temos c operações, em que em cada operação tem n máquinas idênticas em paralelo. Cada trabalho deve ser processado primeiro na operação 1 e de seguida na operação 2 e assim sucessivamente. Em cada operação do trabalho j requer processamento numa máquina e qualquer uma pode fazê-lo.

Para a resolução deste problema foi usado o sistema LEKIN. Para tal escolhemos a opção *Flexible Flow Shop*, e inserimos o número de centros de trabalho (2) e as tarefas (9). Após a introdução de todos os dados procedeu-se ao escalonamento, isto é à escolha do algoritmo/regra para a alocação de tarefas ao trabalho. Ao longo deste capítulo mostraremos os resultados obtidos para os diferentes métodos de escalonamento.

3.1 Regra de SPT

A regra SPT, *Shortest Processing Time* refere que quando uma máquina fica livre, de todas as entidades na fila de espera respectiva, é seleccionada para processamento aquela que tem menor tempo de processamento nessa mesma máquina. Quando nos referimos a problemas de máquina única esta regra consegue garantir o menor tempo de percurso médio.

3.1.1 Resultados obtidos com a regra SPT

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 3.1 foi obtido pela regra SPT, esta que permite conseguir um menor tempo de percurso médio. Nesta regra o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 102U.T.

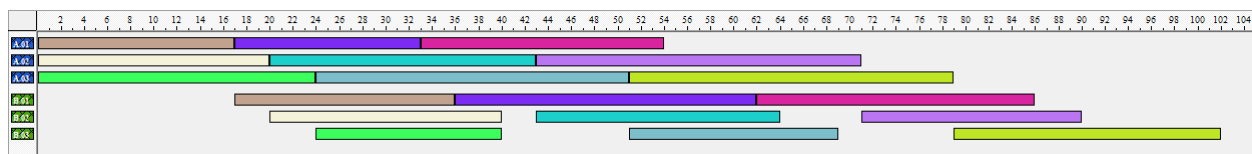


Figura 3.1: Diagrama de Gantt para a regra SPT

Na tabela 3.1 estão sintetizados os resultados obtidos para a regra SPT com as medidas de desempenho pedidas: *makespan*, tempo de percurso médio, atraso máximo, atraso médio e número de lotes atrasados. Relativamente às medidas de desempenho tempo de percurso médio e atraso médio, estas não são diretamente obtidas do LEKIN. Para o cálculo do tempo de percurso médio, foi necessário usar o tempo total de percurso dos lotes e dividir pelo número de lotes. Como se pode observar na fórmula com um exemplo em baixo:

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum F_j = \frac{589}{9} = 65,44U.T.$$

\bar{F} – Tempo de percurso médio

F_j – Tempo de percurso do trabalho j

n – número de lotes;

O atraso médio foi calculado através do somatório do atraso de cada trabalho a dividir pelo número de lotes. Assim, calculou-se o tempo de percurso médio e o atraso médio para cada método, numa folha de *Excel*. Estes cálculos foram efetuados de forma análoga para os restantes métodos apresentados neste relatório.

$$\overline{A} = \frac{1}{n} \sum A_j = \frac{333}{9} = 37U.T. \quad A_j = F_j - d_j$$

\overline{A} – Atraso médio na entrega dos trabalhos

A_j – Atraso relativo à data de entrega do trabalho j

n – Número de lotes

d_j – Data de entrega planeada do trabalho j

Tabela 3.1: Resultados obtidos para a regra SPT nas diferentes medidas de desempenho

	SPT
Makespan	102 U.T
Tempo de percurso Médio	65,44 U.T
Atraso Máximo	87 U.T
Atraso Médio	37 U.T
Número de lotes atrasados	7 lotes

O tempo que em média cada trabalho despende no sistema de produção é de 65,44 U.T.

3.2 Método MS

O método de Minimum Slack (MS) é uma regra alternativa ao método EDD (Earliest Due Date) cujo objetivo reside em minimizar o atraso máximo entre as entidades em fila de espera para o processamento. No caso de um sistema de máquina única, o método Minimum Slack garante encontrar o menor atraso máximo. O método mede a urgência de cada lote, através do seu “slack time”. O processo inicia-se quando é detetada uma máquina livre, isto é, sem entidades a processar nem na fila de espera respetiva. Em seguimento, é selecionado o lote de produção cujo tempo de processamento, até à data prevista para entrega, é menor. Esse tempo, “slack time” ou folga é obtido subtraindo, ao tempo que resta para a entrega do lote, os tempos necessários para o processamento do lote em questão. Sejam d_i e t_i a data prevista para a entrega do lote e o tempo de processamento associado a cada lote sequenciado, respetivamente.

O método MS sequencia os lotes de produção de acordo com a seguinte inequação:

$$d_1 - t_1 \leq d_2 - t_2 \leq \dots \leq d_n - t_n$$

3.2.1 Resultados obtidos com o método MS

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 3.2 foi obtido pela regra MS. Nesta regra o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 96U.T.

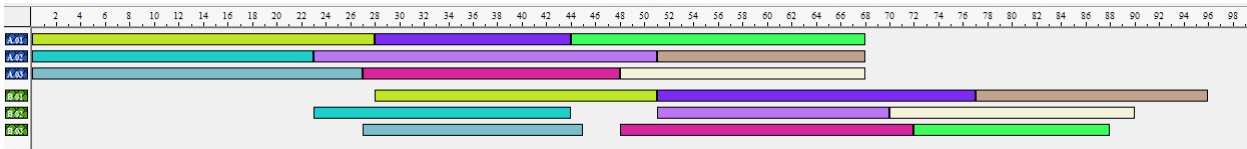


Figura 3.2: Diagrama de Gantt para o método MS

Na tabela 3.2 estão apresentados os resultados obtidos para a regra MS com as medidas de desempenho pedidas: makespan, tempo de percurso médio, atraso máximo, atraso médio e número de lotes atrasados. O tempo que em média cada trabalho despende no sistema de produção é de 70,33 U.T., o atraso máximo é de 51 U.T. e o número de lotes atrasados é de 9.

Tabela 3.2: Resultados obtidos para o método MS

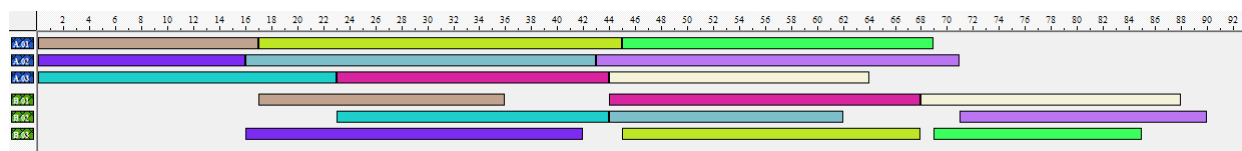
	MS
Makespan	96 U.T.
Tempo de percurso Médio	70,33 U.T.
Atraso Máximo	51 U.T.
Atraso Médio	40,89 U.T.
Número de lotes atrasados	9 lotes

3.3 Heurística *General SB Routine*

O método *General Shifting Bottleneck Routine* (GSBR) é uma heurística muito utilizada quer em sistemas simples, como máquinas paralelas, quer em sistemas mais complexos como as oficinas de fabrico. Neste método o conjunto de todas as m máquinas do sistema é denominado M . É assumido, em cada iteração, que uma seleção de arcos disjuntos foi fixada num subconjunto a que se chama M_0 . Assim sendo, foi determinada uma sequência de operações para cada uma das máquinas em M_0 . Uma iteração determina, entre as máquinas $M - M_0$, a que deve ser incluída no conjunto M_0 e a sequência das operações para a mesma. Para que uma máquina seja selecionada para M_0 é feita uma tentativa para determinar qual, das máquinas ainda não alocadas, a que está a causar maior perturbação no sistema. Esta operação consiste na modificação do grafo original (G) pela exclusão de todos os arcos disjuntos das máquinas ainda por programar ($M - M_0$) mantendo-se apenas os arcos disjuntos relevantes das máquinas pertencentes a M_0 . Este novo grafo é denominado G' . Eliminar os arcos disjuntos de uma máquina implica que todas as operações que inicialmente apenas poderiam ser feitas nessa máquina, agora podem ser processadas em máquinas paralelas. O grafo G' tem um ou mais caminhos críticos que determinam o makespan correspondente. (Pinedo (2008)) Neste trabalho a heurística GSBR foi utilizada para sequenciar os 9 lotes minimizando o makespan.

3.3.1 Resultados obtidos com a heurística *General SB Routine*

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 3.3 foi obtido pela heurística *General SB Routine*. Com este método o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 90U.T..

**Figura 3.3:** Diagrama de Gantt para *General SB Routine***Tabela 3.3:** Resultados obtidos para a Heurística *General SB Routine* com diferentes medidas de desempenho

	<i>General SB Routine</i>
Makespan	90 U.T.
Tempo de percurso Médio	64,78 U.T.
Atraso Máximo	65 U.T.
Atraso Médio	36,33 U.T.
Número de lotes atrasados	8 lotes

Os resultados obtidos para a resolução do problema com recurso à heurística *General SB Routine*, para minimização do tempo total de produção (C_{max}), estão representados na tabela 3.3 é possível perceber que o tempo de percurso médio é de 64,78 U.T., o atraso máximo é de 65 U.T., o atraso médio é de 36,33 U.T. e o número de lotes atrasados é de 8.

4. Ambiente em oficina flexível (*Flexible Job Shop* - FJS)

Uma oficina flexível é uma generalização de oficinas e máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série, existem c centros de trabalho onde em cada centro de trabalho tem n máquinas idênticas em paralelo. Cada trabalho tem seu próprio caminho para seguir pela oficina; trabalho j requer processamento em cada centro de trabalho em apenas uma máquina e qualquer máquina pode fazer isso.

Para a resolução neste ambiente foi usado mais uma vez o sistema LEKIN mas desta vez utilizou-se a opção *Flexible Job Shop*. Foram inseridos os valores do problema novamente, mas desta vez a ordem de realização das operações a partir do lote 5, inclusive, são por ordem inversa do fluxo normal de produção da configuração em linha flexível. Ou seja, a partir do lote 5 inicia-se o processo de produção com a operação 2 no grupo de máquinas B e logo após a operação 1 no grupo de máquinas A.

4.1 Regra LPT

Uma regra de prioridade é aquela que estabelece a prioridade com que serão processadas as entidades que aguardam processamento numa máquina. A forma como cada prioridade surge está relacionada com os atributos das entidades, atributos das máquinas, ou também com o factor tempo.

A regra LPT, designada por *Longest Processing Time*, estabelece que quando uma máquina fica livre, de todas as entidades na fila de espera respetiva, é selecionada para processamento a entidade que tem o maior tempo de processamento nessa mesma máquina.

4.1.1 Resultados obtidos com o método LPT

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 4.1 foi obtido pela regra LPT. Nesta regra o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 81U.T..

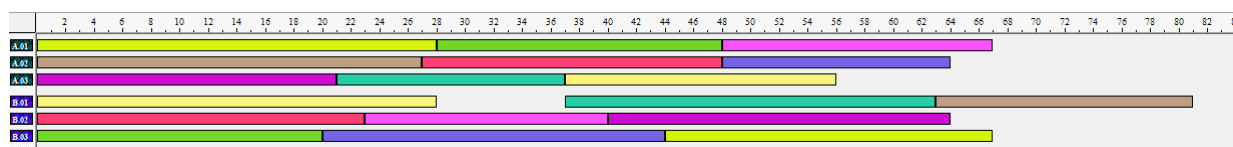


Figura 4.1: Diagrama de Gantt para o método LPT

Os resultados obtidos para a resolução do problema com recurso ao método LPT estão representados na tabela 4.1 é possível perceber que o tempo total de produção de 81 U.T., o tempo que em média cada trabalho despende no sistema de produção é de 62 U.T., o atraso máximo é de 61 U.T., o atraso médio é de 32,56 U.T. e o número de lotes atrasados é de 9.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para o método LPT

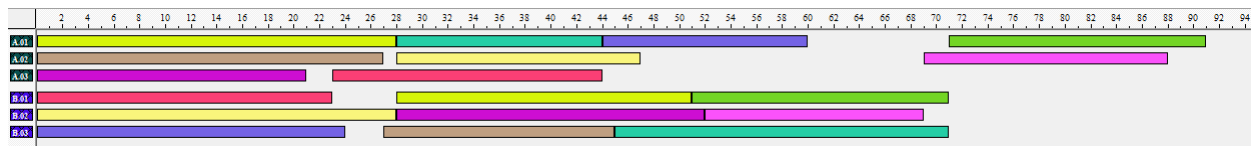
	LPT
Makespan	81 U.T.
Tempo de percurso Médio	62,00 U.T.
Atraso Máximo	61 U.T.
Atraso Médio	32,56 U.T.
Número de lotes atrasados	9 lotes

4.2 Regra EDD

A regra EDD *Earliest Due Date* também conhecida como uma regra de prioridade que prioriza os trabalhos com menor data de entrega estabelece que quando uma máquina fica livre, de todas as entidades na fila de espera respectiva, é seleccionada para processamento a entidade com a data cuja entrega é mais cedo. Esta regra tende a minimizar o atraso máximo entre as entidades da fila de espera. Nos casos em que apenas consideramos máquina única, EDD garante encontrar o menor atraso máximo.

4.2.1 Resultados obtidos com o método EDD

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 4.1 foi obtido pela regra EDD. Nesta regra o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 91U.T..

**Figura 4.2:** Diagrama de Gantt para o método EDD**Tabela 4.2:** Resultados obtidos para o método EDD

	EDD
Makespan	91 U.T.
Tempo de percurso Médio	61,00 U.T.
Atraso Máximo	51 U.T.
Atraso Médio	31,56 U.T.
Número de lotes atrasados	9 lotes

Os resultados obtidos para a resolução do problema com recurso ao método EDD estão representados na tabela 4.2. É possível perceber que o tempo total de produção de 91 U.T., o tempo de percurso médio é de 61 U.T., o atraso máximo é de 51 U.T., o atraso médio é de 31,56 U.T. e o número de lotes atrasados é de 9.

4.3 Heurística *General SB Routine*

4.3.1 Resultados obtidos com a heurística *General SB Routine*

O diagrama de *Gantt* apresentado na figura 4.1 foi obtido pela heurística *General SB Routine*. Com esta heurística o instante máximo de conclusão dos trabalhos em curso de fabrico (*makespan*) foi de 69U.T..

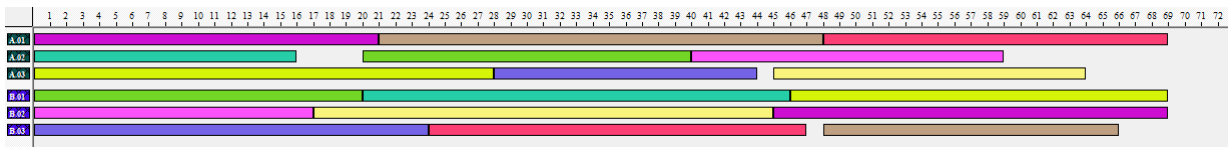


Figura 4.3: Diagrama de Gantt para a Heurística *General SB Routine*

Os resultados obtidos para a resolução do problema com recurso à Heurística *General SB Routine*, para minimização do tempo total de produção (*Cmax*), estão representados na tabela 4.3 é possível perceber que o tempo total de produção de 69 U.T., o tempo de percurso médio é de 58,44 U.T., o atraso máximo é de 59 U.T., o atraso médio é de 29 U.T. e o número de lotes atrasados é de 8.

Tabela 4.3: Resultados obtidos para Heurística *General SB Routine*

	General SB Routine
Makespan	69 U.T.
Tempo de percurso Médio	58,44 U.T.
Atraso Máximo	59 U.T.
Atraso Médio	29 U.T.
Número de lotes atrasados	8 lotes

5. Métodos/Abordagens de escalonamento da produção alternativos

Além dos métodos que o sistema LEKIN possui para fazer o escalonamento existem outros, como os algoritmos de Hodgson e Jonhson para programação da produção em ambientes de linha de produção (*Flow Shop*) e o algoritmo de Jackson, para programação em ambientes de oficina (*Job Shop*).

5.1 Flexible Flow Shop

Em ambiente de linha de produção Flexível foram considerados como métodos alternativos a regra WSPT e FCFS.

5.1.1 Regra WSPT

A regra WSPT é uma variação do SPT. Este método sequencia os lotes pelas máquinas livres atendendo aos tempos de processamento dos mesmos e ao seu peso. O lote é selecionado atendendo à razão t_i/w_i , sendo t_i o tempo de processamento do lote i e w o peso do mesmo. A sequência é definida escolhendo os lotes por ordem crescente da razão t_i/w_i (Hochbaum (1999)). Em ambiente de máquina única, o WSPT minimiza o tempo de percurso médio dos lotes.

5.1.2 Regra FCFS

Quando uma máquina fica livre, de todas as entidades na fila de espera respectiva, é seleccionada para processamento a entidade que mais cedo chegou à fila de espera respectiva. Esta regra garante que nenhuma entidade fica eternamente na fila de espera, ao contrário das duas regras anteriores que em casos extremos não dão esta garantia.

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	ΣU_i	ΣC_i	ΣT_i	$\Sigma w_i C_i$	$\Sigma w_i T_i$
FCFS	1	91	54	9	631	366	631	366
General SR Routine / Cmax	1	90	65	8	583	327	583	327
MS	1	96	51	9	633	368	633	368
SPT	1	102	87	7	589	333	589	333
WSPT	1	102	87	7	589	333	589	333

Figura 5.1: Resultados obtidos para os diferentes métodos incluindo o metodo WSPT e FCFS

Os resultados obtidos revelam que utilizar a regra SPT e a regra WSPT é igual, gerando assim, resultados iguais. Utilizando a ferramenta *Select performance measures* foi possível obter um grafico de barras para cada medida de desempenho, de acordo com as regras e heurísticas enunciadas em cima.

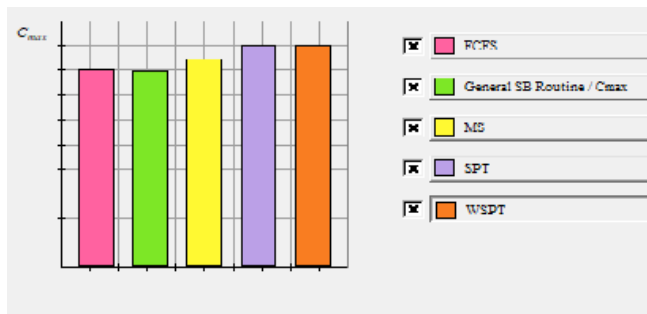


Figura 5.2: Gráfico de barras do tempo total de produção (C_{max}) obtido para cada algoritmo usado

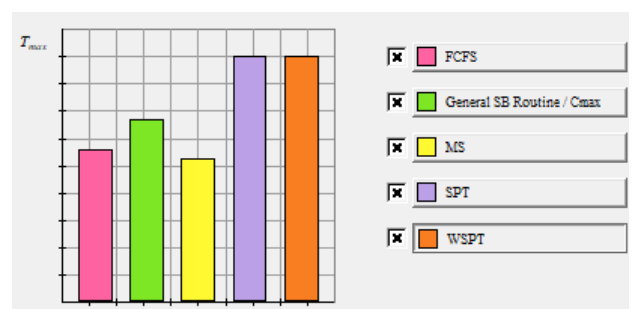


Figura 5.3: Gráfico de barras do atraso máximo (T_{max}) obtido para cada algoritmo usado

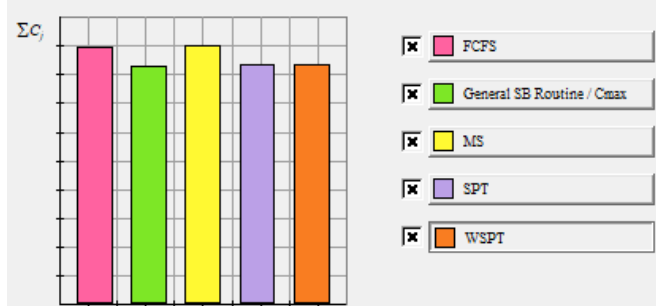


Figura 5.4: Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado

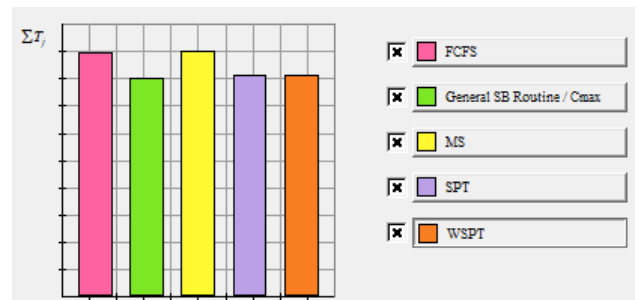


Figura 5.5: Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado

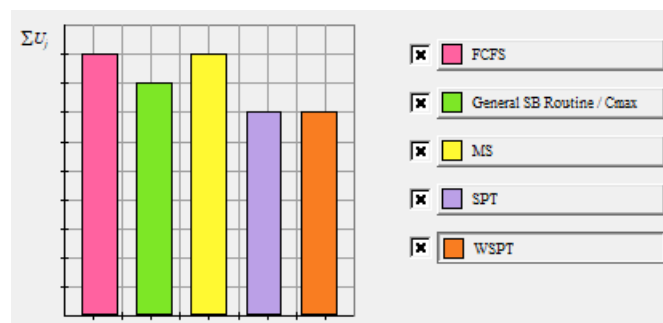


Figura 5.6: Gráfico de barras do número de lotes atrasados obtido para cada algoritmo usado

5.2 Flexible Job Shop

Relativamente a ambiente de oficina flexível foram abordados as regras CR e ATCS como alternativas aos métodos anteriormente abordados.

5.2.1 Regra CR

A regra CR define a diferença entre a data de entrega e a data atual dividida pelo tempo de processamento.

$$CR_i = \frac{DataDeEntrega_i - TempoAtual}{TempoProcessamentoRestante}$$

Segundo Nahmias (Nahmias (1993)) e Slack (Nigel Slack (2010)) CR serve para balancear as regras SPT e EDD onde apenas são considerados o tempo de processamento e data de entrega, respetivamente. Ao utilizar uma regra de sequenciamento CR, as tarefas que apresentem um menor valor CR são priorizadas, tendo como características a data de entrega mais próxima e o tempo de processamento mais longo. O numerador pode tornar-se negativo, o que significa que a tarefa está em atraso, passando assim a ser prioritária. Caso exista mais do que uma tarefa em atraso é recomendável aplicar a regra SPT. Podemos observar que os resultados de CR e EDD são exatamente iguais.

5.2.2 Regra ATCS

O presente método apresenta resultados satisfatórios quando aplicado a ambientes de produção com linhas de produção e máquina única. Este método tem como objetivo minimizar o atraso de um conjunto de tarefas. O Método de ATC (*Apparent Tardiness Cost*) é composta pela heurística WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*), aplicado quando o objetivo é priorizar as atividades de menor tempo de processamento e composta pela heurística MS (*Minimum Slack*), com a finalidade de priorizar as atividades com menor tempo de folga. Assim, o ATC é determinado pela seguinte equação (Pinedo and Lee (1997)):

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{k_p}\right)$$

Onde I_j é o índice de priorização da tarefa j no tempo t ; w_j é o peso que define a priorização do trabalho j , tal como o custo de manter o trabalho no sistema; p é o tempo de processamento da tarefa j e d , o prazo de execução da tarefa j . K_p é um parâmetro de escala determinado empiricamente, por uma estatística. Esta regra não considera tempos de preparação (*Setups*) de trabalhos (Noal (2015)). O tempo setup influencia o ordenamento dos lotes, priorizado as tarefas cujo tempo de preparação é inferior. Assim, é considerada a regra ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*), que é determinada através da seguinte equação (Pinedo and Lee (1997)):

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{k_p}\right) * \exp\left(-\frac{\delta l_j}{k_{2s}}\right)$$

Os parâmetros da equação são os mesmos da equação do ATC, exceção feita a δl_j , que representa o tempo setup criado pela transição da tarefa l a tarefa j e a K_{2s} que representa uma constante empiricamente definida.

Schedule	Time	C_{max}	T_{max}	ΣU_i	ΣC_i	ΣT_i	$\Sigma w_i C_i$	$\Sigma w_i T_i$
ATCS (1,1)	1	111	86	8	599	334	599	334
CR	1	91	51	9	549	284	549	284
EDD	1	91	51	9	549	284	549	284
General SB Routines / Cmax	1	69	54	8	526	261	526	261
LPT	1	81	61	9	558	293	558	293

Figura 5.7: Resultados obtidos para os diferentes métodos incluindo o metodo CR e ATCS

Da análise dos resultados obtidos, observa-se que a abordagem com a regra EDD e com a regra CR são iguais.

Utilizando a ferramenta *Select performance measures* foi novamente possível obter um gráfico de barras para cada medida de desempenho nomeadamente às regras que foram consideradas como alternativas. Como esperado, as regras EDD e CR apresentam resultados, para cada medida de desempenho iguais, confirmando assim, que são, de facto, alternativos e que resolvem o problema.

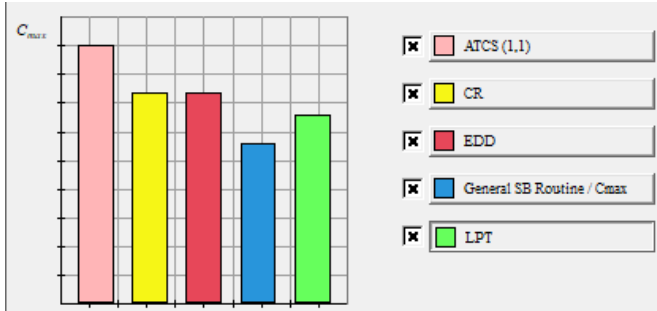


Figura 5.8: Gráfico de barras do tempo total de produção (Cmax) obtido para cada algoritmo usado

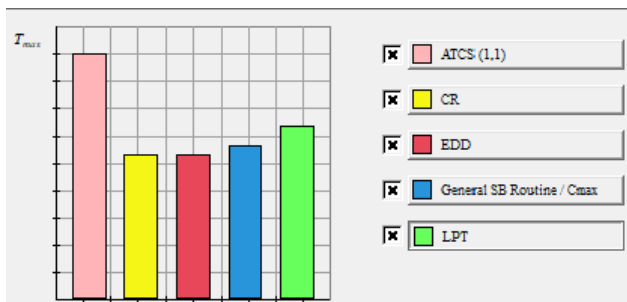


Figura 5.9: Gráfico de barras do atraso máximo (Tmax) obtido para cada algoritmo usado

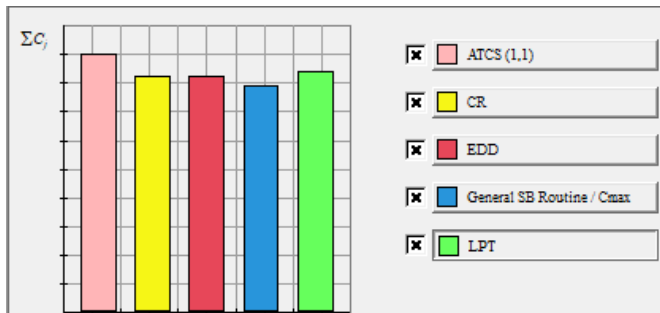


Figura 5.10: Gráfico de barras do tempo de percurso total obtido para cada algoritmo usado

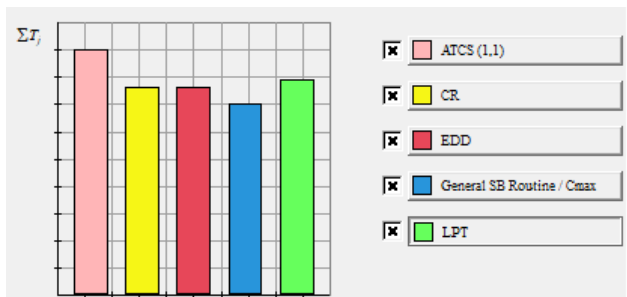


Figura 5.11: Gráfico de barras do atraso total obtido para cada algoritmo usado

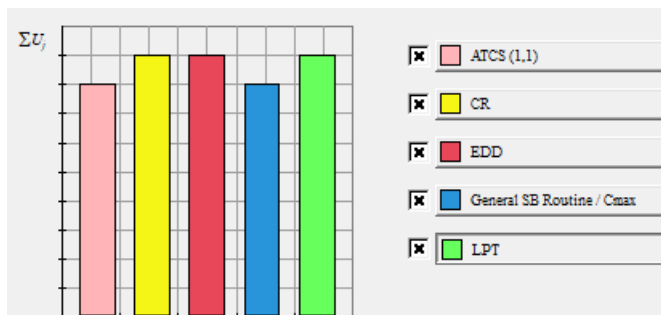


Figura 5.12: Gráfico de barras do número de lotes atrasados obtido para cada algoritmo usado

6. Discussão dos Resultados

6.1 Flexible Flow Shop

No gráfico 6.1 estão representados os resultados para as várias medidas de desempenho para os diferentes métodos utilizados para o ambiente em linha de produção flexível. Podemos concluir que para a medida de desempenho do tempo total de produção dos lotes (*makespan*) o método com melhores resultados foi o GSBR com 90 U.T.. Para a medida de desempenho de tempo de percurso médio (\bar{F}) foi também o GSBR com 64,78 U.T. . Para a minimização do atraso máximo (A_{max}) o método com melhores resultados neste ambiente foi o MS com 51U.T. de atraso. Porém para o atraso médio (\bar{A}) o método com melhores resultados foi o GSBR com 36,33 U.T. de atraso. O método que permitiu o menor número de lotes em atraso foi o SPT com 7 lotes atrasados.

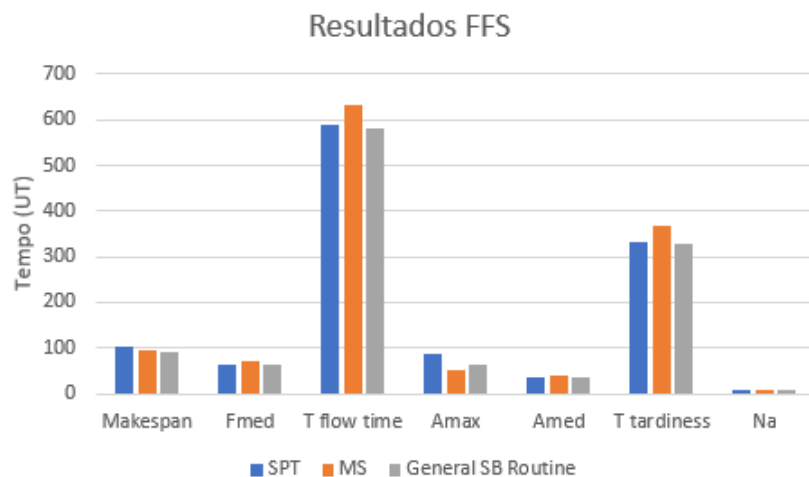


Figura 6.1: Gráfico de resultados para linhas de produção flexíveis

Tabela 6.1: Resultados obtidos para os diferentes métodos e medidas de desempenho

	SPT	MS	General SB Routine
Makespan	102	96	90
Tempo de percurso Médio	65,44	70,33	64,78
Atraso Máximo	87	51	65
Atraso Médio	37	40,89	36,33
Número de lotes atrasados	7	9	8

6.2 Flexible Job Shop

No gráfico 6.2 estão representados os resultados para as várias medidas de desempenho para os diferentes métodos utilizados para o ambiente em oficinas flexíveis. Podemos concluir que para a medida de desempenho do tempo total de produção dos lotes (*makespan*) o método com melhores resultados foi o

GSBR com 69 U.T.. Para a medida de desempenho de tempo de percurso médio (\bar{F}) foi também o GSBR com 58,44 U.T. . Para a minimização do atraso máximo (A_{max}) o método com melhores resultados neste ambiente foi o EDD com 51U.T. de atraso. Porém para o atraso médio (\bar{A}) o método com melhores resultados foi o GSBR com 29 U.T. de atraso. O método que permitiu o menor número de lotes em atraso foi o GSBR com 8 lotes atrasados.

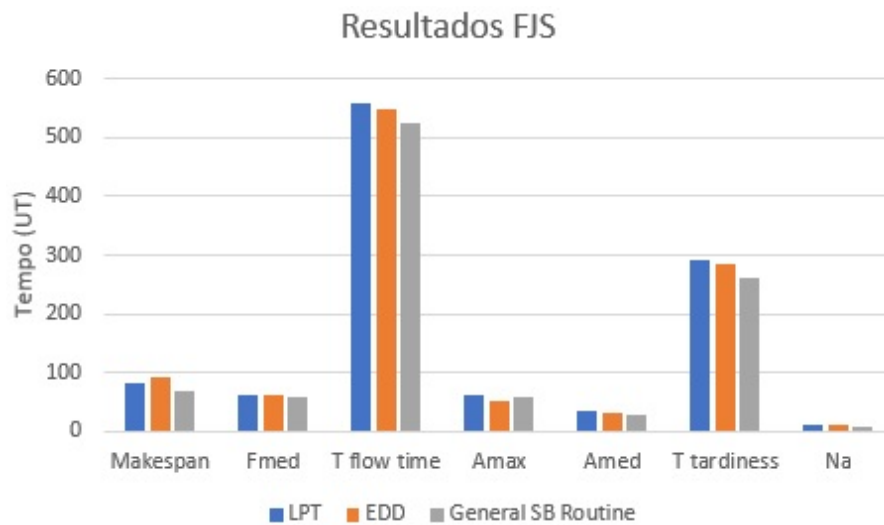


Figura 6.2: Gráfico de resultados para oficinas flexíveis

Tabela 6.2: Resultados obtidos para os diferentes métodos e medidas de desempenho

	LPT	EDD	General SB Routine
Makespan	81	91	69
Tempo de percurso Médio	62,00	61,00	58,44
Atraso Máximo	61	51	59
Atraso Médio	32,56	31,56	29
Número de lotes atrasados	9	9	8

7. Conclusões

O escalonamento da produção é uma função que pode contribuir fortemente para a capacidade competitiva das empresas produtoras de bens e serviços. Pode, simplificada, ser definido com a função de afectar tarefas a meios de produção ao longo do tempo. Para resolver um problema de escalonamento é necessário envolver várias actividades. Primeiro é indispensável descrever o problema e identificá-lo numa dada classe. Depois, é necessário encontrar um método eficiente apropriado à sua resolução e usá-lo para resolver o problema, disponibilizando os dados necessários e tratando os resultados de forma conveniente.

Assim, surgiu como forma de resolver vários problemas, a ferramenta LEKIN que tal como referido, resolve problemas de escalonamento da produção. Esta ferramenta apresenta-se um pouco limitada, na medida em que não resolve todos os métodos, regras e heurísticas, no entanto, é bastante simples de usar e mostra os resultados de forma rápida e sucinta.

Relativamente ao *Flexible Flow Shop*, foram abordados três métodos, dos quais o *General SB Routine* que apresenta valores de *makespan*, tempo de percurso médio e atraso médio menores em relação às regras SPT e MS. A regra SPT apresentou o menor número de lotes atrasados. Em relação ao atraso máximo, a medida de desempenho que o minimiza é o MS.

De acordo com os resultados obtidos sobre *Flexible Job Shop*, evidenciados na figura 6.2, a heurística *General SB Routine* minimiza o *makespan*, tempo de percurso médio, atraso médio e o número de lotes atrasados. O melhor resultado da medida de desempenho do atraso máximo foi obtida utilizando a regra EDD.

Bibliografia

- Carmo-Silva, S. (2015). Textos de gestão da produção (rev 04-2015).
- Hochbaum, P. D. S. (1999). The scheduling problem. <http://riot.ieor.berkeley.edu/Applications/Scheduling/algorithms.html>. acesso 2018-12-27.
- Nahmias, Y. C. . S. (1993). *Production and operations analysis*. Irwin Homewood, volume 2 edition.
- Nigel Slack, Stuart Chambers, e. R. J. (2010). *Operations management*. Pearson education.
- Noal, L. C. (2015). Sequenciamento de tarefas em sistemas de pintura balizado por heurísticas do tipo atc (apparent tardiness cost).
- Pinedo, M. and Lee, Y. H. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, (100):464–474.
- Pinedo, M. L. (2008). *Theory, Algorithms, and Systems*. Springer, 3rd edition.
- Varela, M. L. R. (2007). Uma contribuição para o escalonamento da produção baseado em métodos globalmente distribuídos.