

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RENATO GONÇALVES VIEIRA ARAUJO
VICTOR BERNARDINO ARAUJO

APLICAÇÃO E ANÁLISE DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA A
RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE *JOB SHOP*

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2019

RENATO GONÇALVES VIEIRA ARAUJO

VICTOR BERNARDINO ARAUJO

**APLICAÇÃO E ANÁLISE DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA A
RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE *JOB SHOP***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Luiz de Melo

PONTA GROSSA

2019

	<p>Ministério da Educação UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ CÂMPUS PONTA GROSSA Departamento Acadêmico de Engenharia de Produção</p>	 <p>UTFPR UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ</p>
---	--	--

TERMO DE APROVAÇÃO DE TCC

APLICAÇÃO E ANÁLISE DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE JOB SHOP

por

RENATO GONÇALVES VIEIRA ARAUJO
VICTOR BERNARDINO ARAUJO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 03 de maio de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profº. Dr. Everton Luiz de Melo
Prof. Orientador

Profª. Dra. Yslene Rocha Kachba
Membro titular

Profº. Dr. Fabio José Ceron Branco
Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

RESUMO

ARAUJO, Renato Gonçalves Vieira; ARAUJO, Victor Bernardino. **Aplicação e análise de métodos heurísticos para a resolução de problemas de *Job Shop***. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Cada vez mais empresas buscam aumentar sua eficiência e sua produtividade através da eliminação de desperdícios, de modo a alocar da melhor maneira possível os seus recursos materiais, humanos e produtivos. Para que isso seja possível existe uma série de abordagens aptas, umas delas é a programação de tarefas. Ela pode auxiliar na redução de custos ordenando a produção de maneira a maximizar a utilização de seus recursos. A aplicação de métodos heurísticos para resolução de problemas de sequenciamento de tarefas se torna extremamente viável conforme a quantidade de variáveis aumenta, devido à sua capacidade de apresentar soluções de boa qualidade em tempo hábil. O intuito deste trabalho é aplicar e analisar métodos heurísticos baseados em *Shortest Processing Time* (SPT), *Longest Processing Time* (LPT) e *Earliest Due Dates* (EDD) para resolução de problemas de ordenação de tarefas em um ambiente de produção *job shop* e verificar seu desempenho para minimização do *makespan* e do custo de multa por atraso. Para isto foram desenvolvidos dois algoritmos diferentes, aqui chamados de Método 1 e Método 2. Os resultados obtidos através dos experimentos computacionais mostraram a vantagem da heurística SPT na redução do *makespan* em ambos os métodos implementados. Por outro lado, para a redução dos custos de multa por atraso o Método 1 obteve melhor desempenho com a SPT enquanto o Método 2 alcançou melhores resultados com a EDD.

Palavras-chave: Programação de tarefas. *Job shop*. Heurísticas. Pesquisa operacional.

ABSTRACT

ARAUJO, Renato Gonçalves Vieira; ARAUJO, Victor Bernardino. **Application and analysis of heuristic methods to solve Job Shop scheduling problems**. 2019. 52 f. Work of Conclusion Course (Graduation in Industrial Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

More than ever companies are looking to increase their efficiency and productivity by eliminating waste in order to better allocate their material, human and productive resources. To allow this there are a number of apt tools, one of which is scheduling. It assists in reducing costs by ordering production to maximize the utilization of its resources. The application of heuristic methods to solve job sequencing problems becomes extremely feasible as the amount of variables increases due to its ability to present good quality solutions in a small amount of time. The purpose of this paper is to apply and analyze the following heuristics methods: Shortest Processing Time (SPT), Longest Processing Time (LPT) e Earliest Due Dates (EDD) for solving job ordering problems in a job shop production environment and verifying their performance to minimize makespan and delay fee cost. Two algorithms were developed, named as Method 1 and Method 2. The results obtained through the computational experiments show advantage of the SPT heuristic in the makespan minimization in both methods applied. For the delay fee minimization, method 1 shows better results with the SPT heuristic, while method 2 works better with EDD solution for the delay fee cost.

Keywords: Scheduling. Job Shop. Heuristic. Operational Research.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 PROBLEMA	7
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 Objetivo Geral.....	7
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3 JUSTIFICATIVA	8
1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA	9
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	10
2.2 PESQUISA OPERACIONAL.....	14
2.3 PROGRAMAÇÃO DE TAREFAS	18
2.4 <i>JOB SHOP</i>	20
2.4.1 Modelagem Matemática do <i>Job shop</i>	22
2.5 HEURÍSTICAS	23
3 METODOLOGIA	26
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	26
3.1.1 Natureza	26
3.1.2 Objetivos.....	26
3.1.3 Procedimentos	27
3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS.....	27
3.3 OPERACIONALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	27
3.4 VERIFICAÇÃO DE MELHORIA	28
4 DESENVOLVIMENTO	29
4.1 INSTÂNCIAS	29
4.2 MÉTODOS.....	29
4.2.1 Método 1	30
4.2.2 Método 2.....	32
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
5.1 ANÁLISE DOS CUSTOS DE ATRASO.....	36
5.2 ANÁLISE DO <i>MAKESPAN</i>	41
6 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem como uma de suas principais funções gerar um processo de trabalho de forma a alcançar os melhores resultados para a organização. Tendo de maneira clara as matérias primas que devem ser compradas, os produtos que devem ser produzidos, as especificações dos clientes e as datas de entregas estabelecidas (SLACK et al., 2006).

Uma maneira clara e competente de aumentar a eficiência da produção é fazendo uso da programação das tarefas, também conhecida como *scheduling*.

Essa área tem como função a alocação de tarefas a recursos produtivo com o propósito de otimizar, por exemplo, o custo, o atraso das tarefas ou até mesmo o tempo de utilização das máquinas (LEUNG, 2004).

O *job shop* é um ambiente produtivo de forma que m máquinas diferentes devem processar operações de n tarefas, de forma que cada tarefa possui uma ordem específica e previamente conhecida de execução, ou seja, cada produto possui uma rota própria de processamento (WANG; BRUNN, 2000). O *job shop* tem como objetivo a definição do sequenciamento das tarefas de forma a otimizar uma das medidas de desempenho como as citadas anteriormente.

Sendo o objeto de estudo deste trabalho, o *job shop* pode ser resolvido a partir de modelagem matemática e programação matemática, com a qual se obtém o resultado ótimo, ou seja, o melhor resultado possível para o problema (ANDRADE, 2000). Uma solução também pode ser obtida a partir de uma heurística, de forma que bons resultados, não necessariamente ótimos, podem ser encontrados (MORALES, 2012).

O uso do modelo matemático, apesar de ter o melhor resultado possível por apresentar a melhor resposta, nem sempre é praticável. Isso porque conforme a complexidade do problema aumentar, maior será seu tempo para a resolução. Esse alto tempo dificilmente será aceitável em ambientes de grande dinamismo como são os das indústrias. Assim as heurísticas vêm com uma solução para esse problema.

Segundo Carneiro (2010) e Morales (2012), as heurísticas não precisam percorrer todas as soluções possíveis, assim elas buscam soluções de boa qualidade que podem ser obtidas em tempo viável, o que é essencial para a tomada de decisão dentro das organizações.

Sendo assim, essa pesquisa tem como intuito aplicar e analisar métodos heurísticos que apresentam soluções de boa qualidade, com rapidez e simplicidade, na resolução de um problema de programação de tarefas *job shop*.

1.1 PROBLEMA

O problema de pesquisa pode ser enunciado como segue: Quais métodos heurísticos são capazes de obter, com rapidez e simplicidade, soluções de qualidade para um ambiente de produção *job shop*?

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e os objetivos específicos dessa pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem como objetivo geral aplicar a analisar quais são os métodos heurísticos que apresentam soluções de qualidade na solução de um problema de programação de *job shop*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Essa pesquisa tem como objetivos específicos:

- I. Definir o critério de desempenho a ser utilizado;
- II. Identificar os métodos heurísticos construtivos para solução do problema de programação *job shop*;
- III. Selecionar métodos heurísticos para solução do problema;
- IV. Implementar os métodos selecionados; e
- V. Avaliar as soluções encontradas para a identificação do método de melhor qualidade para o problema.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com Leung (2004), quando existir a necessidade de uma tomada de decisão sobre a ordem em que várias tarefas devem ser realizadas, será possível aplicar a um problema de sequenciamento de tarefas (*scheduling*). Sendo casos de programação de tarefas a ordem de ocupação de um hotel, a ordem de decolagem em uma pista de aeroporto, o atendimento de pedidos de uma fábrica montadora ou até mesmo a distribuição dos horários de aulas de professores, o que se percebe que é muito comum e faz parte do cotidiano (FERREIRA, 2012).

De acordo com Gaither e Frazier (2002), a tomada de decisões ruins quanto às operações de uma empresa pode causar uma incorreta alocação de recursos e prejudicar a sua posição competitiva. Já boas decisões podem gerar valores à empresa, por consequência lucratividade e crescimento.

Dessa forma, segundo Ferreira (2012), a utilização e a aplicação de técnicas de programação de tarefas permitem, por exemplo, a redução dos custos e o aumento na agilidade da cadeia de suprimentos, afetando de forma positiva as operações no início e no fim da cadeia de suprimentos.

A escolha da técnica de programação de tarefas apropriada depende de muitos fatores, como a complexidade do problema, a natureza do modelo e a escolha dos critérios, podendo, em muitos casos, considerar a utilização de múltiplas técnicas. Sendo assim, o estudo de programação de tarefas trata tanto do estudo de metodologias como do estudo de modelos (BAKER, 1974).

Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010), a manufatura geralmente requer distinção e/ou diversificação de produtos, produção em pequenos lotes, rápida entrega e aderência às datas de entrega prometidas. A diversificação de produtos e produção em pequenos lotes pode ser interpretada como um ambiente de produção *job shop*, e a rápida entrega e aderência às datas de entrega prometidas pode ser considerada como uma função objetivo a ser otimizada em um problema de programação de tarefas.

Nesse trabalho espera-se que a resolução de um problema de programação de tarefas em um ambiente *job shop* contribua para um melhor entendimento geral da teoria de *scheduling*, fugindo de uma abordagem puramente teórica, para que possa mostrar que organizações podem utilizar técnicas que não possuem uma alta

complexidade e, ainda assim, resultar em um melhor aproveitamento de seus recursos e otimização do processo produtivo.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa busca abranger o tema de programação de tarefas que está englobado pelas áreas de PCP e de Pesquisa Operacional (PO). Para Leung (2004), a programação de tarefas tem como objetivo a alocação de recursos escassos às atividades com o objetivo de otimizar uma ou mais medidas de desempenho. Aplicando esse conceito a esse estudo, o interesse recai sobre a alocação do tempo produtivo de máquinas às tarefas pré-estabelecidas, a partir de uma previsão ou solicitação de produção, de maneira a otimizar um critério de otimização ainda a ser estabelecido.

Para isso, o presente trabalho analisa métodos heurísticos, adaptações aos dados obtidos e às medidas de desempenho para assim apresentar uma solução que resolva com qualidade e rapidez esse problema.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico e seus subitens que tratam do PCP, pesquisa operacional, programação de tarefas, *job shop*, e heurísticas. Em seguida, no Capítulo 3, é discutido sobre a Metodologia utilizada na pesquisa, abordando temas como a classificação, coleta e análise de dados, operacionalização das variáveis e verificação de melhorias.

No Capítulo 4 tem-se o desenvolvimento do trabalho, abrangendo o processo de construção das instâncias e os métodos utilizados. O Capítulo 5 por vez, traz a apresentação e análise dos resultados. Por fim no Capítulo 6 é mostrado a conclusão da pesquisa dando uma perspectiva final sobre as análises e resultados obtidos.

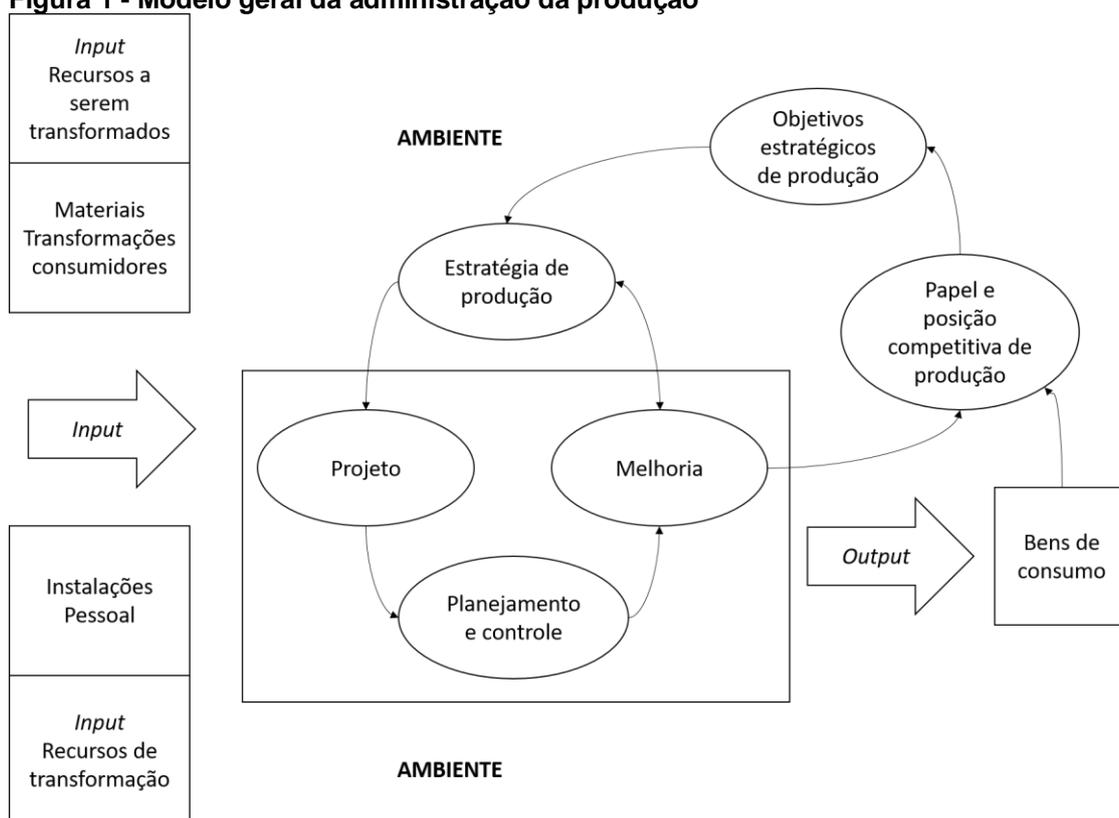
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste Capítulo é realizada uma revisão conceitual de cinco grandes temas na área da produção que estarão presentes neste trabalho, sendo eles o PCP, a PO, a programação de tarefas, o *job shop* e as heurísticas.

2.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Tudo o que se usa no dia a dia, sejam serviços ou produtos, como por exemplo, o que se veste, come ou ao realizar um tratamento em uma clínica, existe graças a administração da produção (SLACK et al., 2006). A Figura 1 representa o modelo geral da administração da produção.

Figura 1 - Modelo geral da administração da produção



Fonte: adaptado de SLACK et al., (2006)

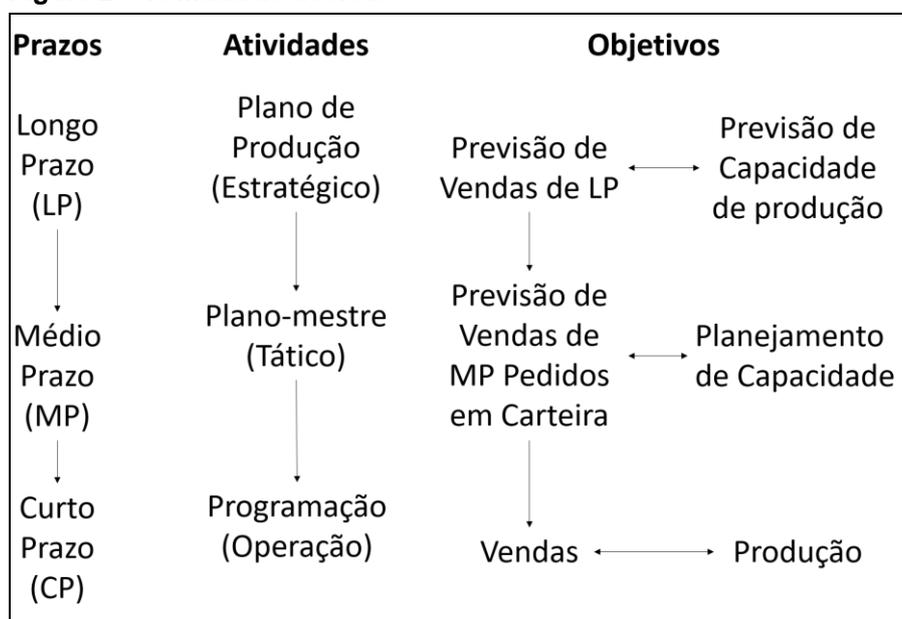
De acordo com Fernandes e Godinho Filho (2010), um sistema de produção é a união de diversos fatores (humanos, físicos e procedimentos gerenciais) que

juntos são capazes de agregar valor e gerar produtos finais, cujo valor será maior do que os custos incorridos para obtê-los.

Para que um sistema produtivo possa funcionar de maneira verdadeiramente eficaz, transformando insumos em produtos finais, é preciso que se estabeleça metas, planos e prazos ao longo do tempo, e que se trabalhe sobre esses planos estabelecidos para que a empresa alcance seus objetivos finais (TUBINO, 2007).

De acordo com Tubino (2007), pode-se dividir o horizonte de planejamento produtivo em três níveis, curto, médio e longo prazo. A Figura 2 apresenta como prazos, atividades e objetivos para a tomada de decisão nas empresas são influenciados de acordo com os níveis apresentados.

Figura 2 – Tomada de decisão



Fonte: adaptado de Tubino (2007)

O PCP é o centro de comando que consegue juntar e unificar todos os níveis citados e combiná-los da melhor maneira para que se obtenha o melhor resultado. No entanto levar todos esses fatores em consideração muitas vezes não é uma tarefa fácil. De acordo com Fernandes e Godinho Filho (2010), diversos fatores influenciam o meio, tais como:

- Consumidor cada vez mais exigente;
- Mercados mais competitivos;
- Competição em nível global;
- Avanços na tecnologia da informação;

- Novos produtos e processos de manufatura;
- Mudanças nos meios de trabalho; e
- Alterações no mix dos custos de produção.

Uma das principais funções do PCP é seguir um fluxo de trabalho na intenção de obter melhores resultados para a empresa de forma geral. Para isso é preciso garantir que a produção ocorra de forma eficaz e produza produtos e serviços como se deve. Isto requer a disponibilidade de recursos produtivos na quantidade adequada, no momento adequado e no nível de qualidade adequado (SLACK et al., 2006).

Para Tubino (2007), existem quatro funções básicas do PCP, sendo elas Planejamento Estratégico da Produção, Planejamento Mestre da Produção, Programação da Produção e, por fim, Acompanhamento e Controle da Produção.

- Planejamento Estratégico da Produção: consiste em elaborar um plano de produção de acordo com as previsões de demanda estimadas e a disponibilidade de recursos da empresa no longo prazo;
- Planejamento Mestre da Produção: consiste em estabelecer um Plano Mestre de Produção (PMP) dos produtos finais da empresa no médio prazo, detalhado período a período, com base nas previsões de vendas;
- Programação da Produção: com base em PMP, estimativas de produção, registros da empresa e informações dos setores de engenharia, pode-se estabelecer no curto prazo, quanto e quando comprar, a quantidade de itens a ser fabricada ou montada e destinada aos produtos finais; e
- Acompanhamento e Controle da Produção: busca garantir que o programa de produção gerado seja executado de maneira satisfatória, através da coleta de dados, o que nos dias atuais pode ser facilmente informatizado e automatizado.

Pode-se perceber que todas as funções do PCP trabalham de maneira interligada, ou seja, uma ação é dependente da outra. Assim um problema que surgir em uma determinada área irá afetar outra região fazendo com que a cadeia como um todo não funcione adequadamente.

O grau de dificuldade de cada uma das atividades desenvolvidas pelo PCP estará ligado ao tipo de sistema produtivo da empresa. Existem diversas formas de classificações de sistemas de produção que podem ser encontrados na literatura. É possível classificar os tipos de produções dependendo do tipo de produto e do tipo de processo. De acordo com Johnson e Montgomery (1974 apud FERNANDES; GODINHO FILHO 2010) tem-se:

- Sistema contínuo: com poucas famílias de produtos e grande volume;
- Sistema de grande projeto: são elaborados produtos grandes e complexos, muitas vezes únicos;
- Sistema intermitente: que podem ser subdivididos em:
 - *Flow shop*: todos os produtos passam pela mesma sequência de operações em uma linha de produção;
 - *Job shop*: os produtos não seguem uma sequência de operações específica, podendo cada um seguir uma linha própria de produção.

O Quadro 1 mostra a diferença básica entre os sistemas *job shop* e *flow shop*, que serão abordados posteriormente.

Quadro 1 – Diferenças básicas entre os sistemas *job shop* e *flow shop*

<i>JOB SHOP</i>	<i>FLOW SHOP</i>
Opera em lotes.	Opera em um fluxo de materiais e peças.
Varia a produção variando o tamanho dos lotes ou frequência dos lotes.	Varia a produção alterando a taxa de produção.
Tende a ter custos maiores de <i>setup</i> .	Tende a ter custos menores de <i>setup</i> .
Materiais são trazidos para os departamentos ou centros de trabalho onde cada operação é realizada. Filas nos centros de trabalho são maiores.	As operações de tipos diferentes são sequenciadas de modo que o fluxo seja mantido. Filas são pequenas e variações têm que ser acompanhadas.
Utilização de equipamentos de uso geral.	Utilização de equipamentos de uso especializado (dedicado).

Fonte: adaptado de Fernandes e Godinho Filho (2010)

A classificação dos tipos de sistemas produtivos tem por finalidade facilitar o entendimento das peculiaridades de cada sistema de produção e a relação existente com a complexidade das atividades de planejamento e controle destes sistemas (TUBINO, 2007).

2.2 PESQUISA OPERACIONAL

Em um mundo altamente globalizado, à medida que se aumenta a complexidade e as especializações dentro de uma organização, torna-se cada vez mais difícil a alocação de recursos para as diversas atividades de maneira efetiva para a organização como um todo. Esse tipo de problema e a necessidade de encontrar a melhor forma de solucioná-lo proveram as condições ideais para o surgimento da PO (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

De acordo com Hillier e Lieberman (2006), a PO envolve “pesquisa sobre operações” de forma que ela é comumente utilizada e aplicada a problemas envolvendo como conduzir e coordenar as operações, atividades ou tarefas de uma determinada empresa. A PO tem sido aplicada de forma substancial a diversas áreas, como manufatura, construção, transportes, planejamento financeiro, PCP e outras.

Desde seu surgimento, esse novo meio de análise de decisão se caracterizou pelo uso de técnicas e métodos científicos quantitativos, para que assim se pudesse encontrar o melhor modo de utilização dos recursos limitados da empresa e gerar a programação otimizada das suas operações (ANDRADE, 2000).

Os problemas que exigem tomadas de decisão dentro da administração e PCP podem ser classificados de diversas maneiras. Uma apresentação geral em que essas decisões podem ser vistas no nível em que ocorrem dentro de uma empresa e do seu grau de complexidade podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Exemplos de tipos de decisão

GRAU DE ESTRUTURAÇÃO DA DECISÃO	↑				
		ALTO	ADMINISTRAÇÃO DE ESTOQUES	PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	LOCALIZAÇÃO DE UMA NOVA FÁBRICA
		MÉDIO	FINANCIAMENTO DE CAPITAL DE GIRO	PROGRAMAÇÃO ORÇAMENTÁRIA	DIVERSIFICAÇÃO POR AQUISIÇÃO DE EMPRESA
BAIXO	ESCOLHA DE CAPA DE REVISTA	CONTRATAÇÃO DE UM DIRETOR	PROGRAMA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO		
		OPERACIONAL	GERENCIAL	ADMINISTRATIVO	NÍVEL ESTRATÉGICO DA DECISÃO
					→

Fonte: adaptado de Andrade (2000)

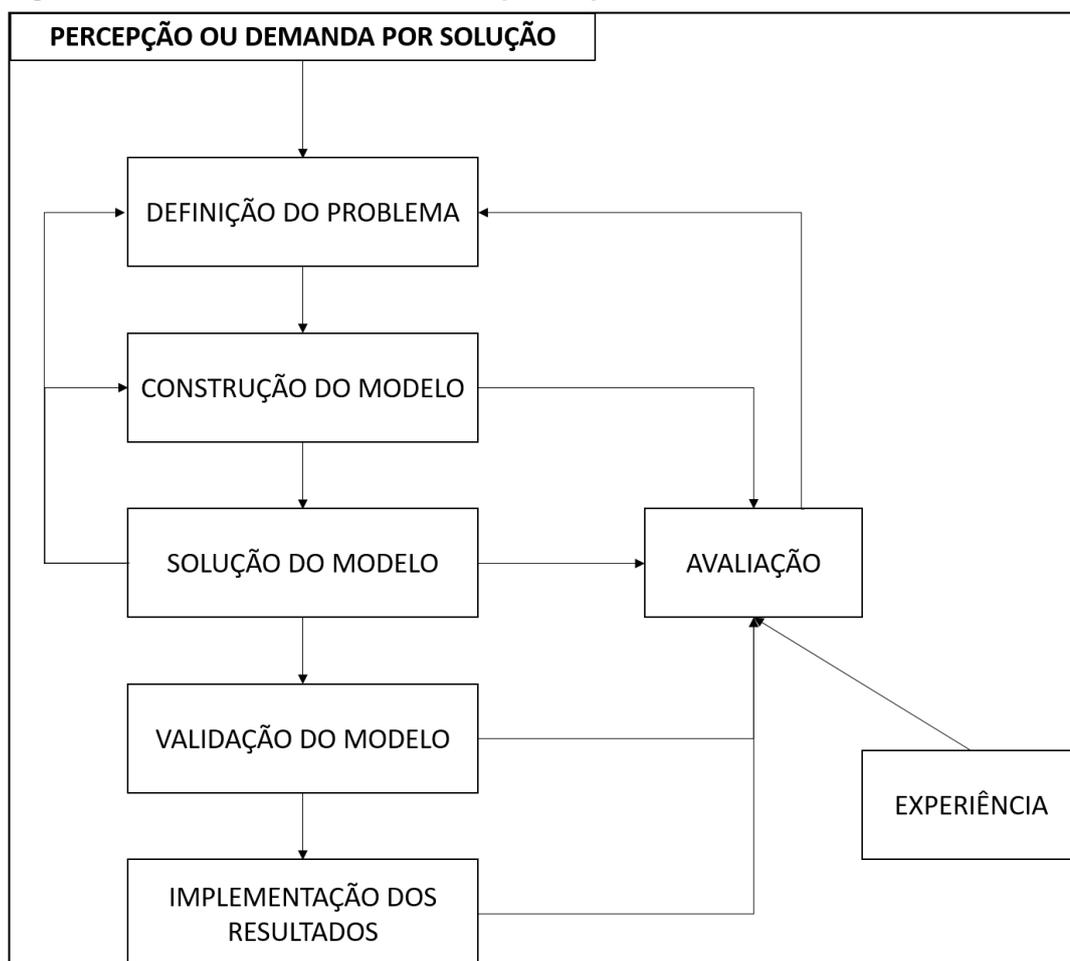
Todos os tipos de tomada de decisão sempre levarão em conta certo grau de experiência e intuição humanas. Quanto mais informações existentes e quanto mais estruturado o problema for, mais o gerente pode contar com o auxílio de técnicas e métodos de PO.

Para Andrade (2000), uma característica muito importante existente na PO é a presença de modelos, o que significa que se permite a “experimentação” de uma solução prévia, o que facilita muito o processo de análise de decisão, podendo assim, testar uma situação antes de implementá-la. A economia gerada e a experiência adquirida vindas da experimentação, por si só, se mostram suficientes para a aplicação da PO como instrumento de gerência.

Uma característica extra advinda da PO, é que a mesma frequentemente busca encontrar uma melhor solução para um dado problema, comumente chamada de solução ótima. O objetivo é sempre encontrar qual o melhor caminho a se seguir. Essa busca pela “otimalidade” deve ser tratada com cuidado e se torna um assunto crucial dentro de PO (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

De forma geral, um trabalho de pesquisa operacional segue as seguintes fases, ou níveis, como é apresentado na Figura 4 (ANDRADE, 2000).

Figura 4 – Fases de um estudo de Pesquisa Operacional



Fonte: adaptado de Andrade (2000)

- Definição do problema: objetivos do estudo, identificação de alternativas de decisão existentes e reconhecimento das restrições e exigências do sistema;
- Construção do modelo: com o problema definido, deve-se representar o modelo da forma mais apropriada de acordo com o sistema;
- Solução do modelo: nesta fase o objetivo é encontrar a solução para o modelo construído;
- Validação do modelo: nessa etapa do processo é necessário verificar a validade do modelo reproduzido. Um modelo é válido a partir de sua capacidade de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema;
- Implementação da solução: após analisadas as vantagens e a validade da solução gerada, esta deve ser implementada em forma de regras operacionais;

- Avaliação final: a avaliação dos resultados obtidos é fundamental em qualquer etapa do processo, pois garantirá melhor adequação e aceitação às necessidades do novo sistema por todos os setores envolvidos.

De acordo com Taha (2008), normalmente o modelo geral de PO pode ser organizado da seguinte maneira:

- Maximizar ou minimizar uma função objetivo;

Sujeito a

- Restrições.

Embora modelos de PO sejam criados com o intuito de otimizar um critério com objetivo específico sujeito a uma série de restrições, a qualidade da resposta final depende de quanto o modelo representa o sistema real (TAHA, 2008).

Para Andrade (2000), a PO tem sido vista pelos gerentes sob dois diferentes tipos de enfoques, o modelo clássico e o modelo atual.

- Modelo clássico: é visto como o conceito quantitativo clássico da PO, aplicando-se técnicas de modelagem e resolução de modelos através de métodos matemáticos para a obtenção de uma solução ótima;
- Modelo atual: esta decorre do conceito qualitativo da PO, de forma que o esforço despendido sob o problema para a modelagem do mesmo leva a uma compreensão mais profunda do próprio problema, podendo assim analisá-lo de forma mais clara e correta.

Em PO não existe apenas uma técnica que consiga resolver todos os problemas e/ou todos os modelos matemáticos que podem surgir na prática. O que ocorre de fato é que o tipo e a complexidade do problema irão determinar a natureza do método de resolução (TAHA, 2008).

De acordo com Taha (2008), a técnica mais utilizada em PO é a programação linear. Ela é aplicada a modelos de forma que as funções objetivo e as restrições são lineares. Outras técnicas importantes que podem ser mencionadas são a programação inteira, a programação dinâmica, a otimização em redes e a programação não linear. Essas são apenas algumas das ferramentas que fazem parte de PO.

2.3 PROGRAMAÇÃO DE TAREFAS

Pode-se imaginar uma situação em que cem pedidos de compras, cada uma com diferentes peculiaridades, tempos de processamento e ordens de fabricação, e que cada um desses pedidos de compra deve passar por trinta diferentes tipos de processos. Frente a essa situação, é possível levantar algumas questões, como: qual tarefa será executada em primeiro lugar e quais tarefas serão executadas posteriormente? Em qual máquina será alocada cada tarefa? Qual é a melhor sequência de operações?

Para auxiliar na tomada dessas decisões, é possível utilizar conceitos de *scheduling*. Traduzindo literalmente, essa palavra assume o sentido de “cronograma” ou “programação”, ou seja, é a ação de montar a programação ou cronograma da produção. Para Leung (2004), a programação de tarefas está interessada na alocação de recursos escassos às atividades com o objetivo de otimizar uma ou mais medidas de desempenho.

Pinedo (2008) detalha que os recursos e as tarefas em uma organização podem tomar diferentes formas. Os recursos podem ser máquinas em uma oficina, pistas em um aeroporto, equipes em uma construção, unidades processadas em um computador. Já as tarefas podem ser operações em um processo produto, decolagens e pousos em aeroportos, estágios em um projeto de construção, execuções de softwares computacionais, entre outras.

Além disso, cada tarefa pode ter certo nível de prioridade, considerando, por exemplo, um curto prazo de entrega ou um longo tempo de processamento. Prioridades estas que implicam diretamente nos objetivos da programação de tarefas, podendo os objetivos tomar diferentes formas, como a minimização do *makespan*, a minimização do *flowtime* ou a minimização do número de tarefas completas após a suas respectivas datas de entrega (PINEDO, 2008).

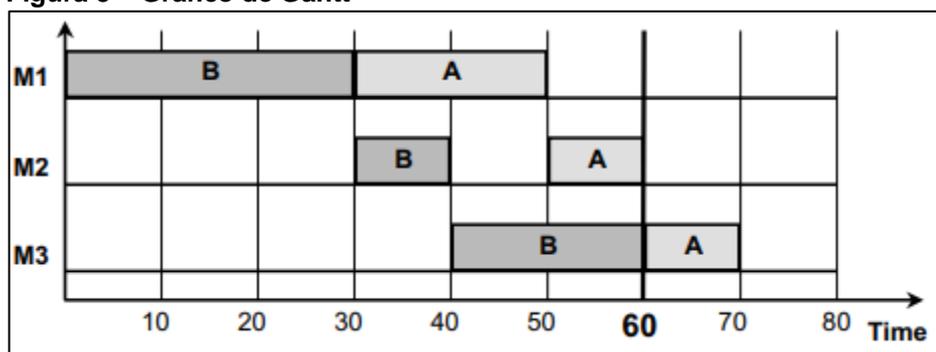
Gantt (1919) apresenta no seu livro *Organizing for Work* uma ferramenta gráfica para representação das atividades realizadas pelos trabalhadores e máquinas, permitindo uma fácil interpretação da programação da produção. Muito usada até hoje, essa ferramenta é chamada de gráfico de Gantt, sendo baseada em dois princípios:

- Medição das atividades pela quantidade de tempo para completá-las;

- O espaço no gráfico pode ser usado para representar a quantidade de atividades que devem ser realizadas naquele tempo.

Como exemplo de gráfico de Gantt pode-se considerar a Figura 5, que mostra um ambiente com três máquinas (M1, M2 e M3) e duas tarefas (A e B).

Figura 5 – Gráfico de Gantt

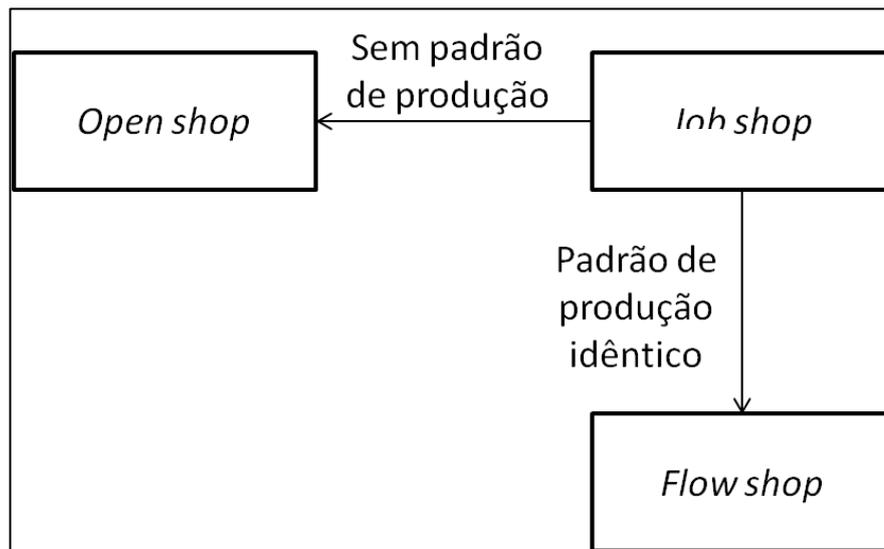


Fonte: Dauzere-Perese e Lasserre (2002)

Na Figura 5 se pode analisar o tempo de processamento de cada tarefa em cada máquina, o instante de início e o instante de finalização de cada tarefa e de cada operação. Gantt (1919) já discutia sobre programação de tarefas em seu livro *Work, Wages and Profits* em que afirma que o simples ato de entregar uma lista de tarefas diariamente ao funcionário irá aumentar consideravelmente a sua eficiência, pois todas as tarefas já estarão listadas, permitindo evitar interferências e falta de materiais ou ferramentas. Apesar disso, a programação de tarefas só passou a receber uma real atenção a partir da década de 50, segundo Leung (2004), pesquisadores em PO, engenharia industrial e administração enfrentavam o problema de gerenciar muitas atividades ocorrendo no chão de fábrica ao mesmo tempo.

De acordo com MacCarthy e Liu (1993), os problemas de programação de tarefas enfrentados podem ser classificados como *job shop*, *flow shop* e *open shop* e cada um tem seus diferenciais, como se pode ver na Figura 6.

Figura 6 – Diferenciação entre os problemas de programação da produção



Fonte: Adaptado de MacCarthy e Liu (1993)

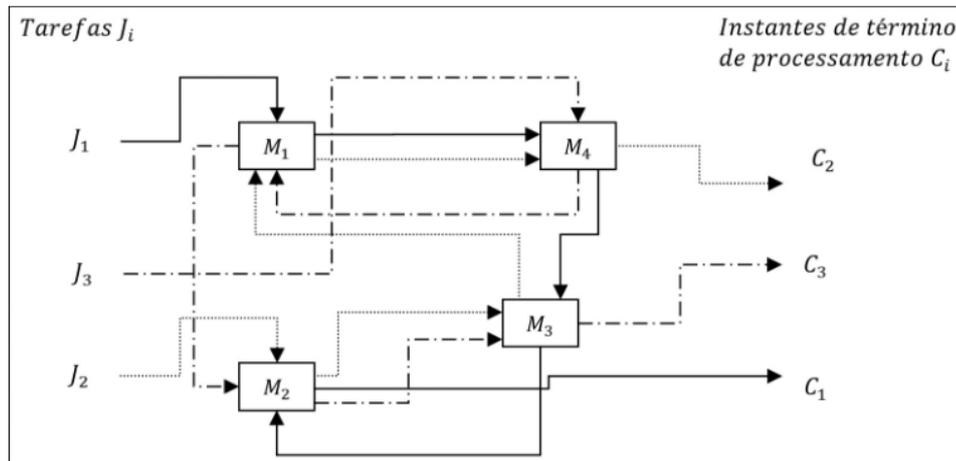
- *Job shop*: Cada tarefa tem sua rota através das máquinas definidas e que devem ser respeitadas;
- *Flow shop*: Todas as tarefas seguem uma mesma rota de produção; e
- *Open shop*: Não existe uma rota de produção a ser seguida.

2.4 JOB SHOP

Segundo Sharma e Jain (2015) o *job shop*, é um problema de otimização combinatória, classificado como NP-Difícil e é uma das programações da produção mais comuns e complexas.

Wang e Brunn (2000) apresentam o *job shop* como uma composição de um conjunto de n tarefas $J=\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ que devem ser processadas por um conjunto de m máquinas $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ e cada tarefa tem apenas uma operação em cada máquina, ou seja, cada tarefa consiste em exatamente um conjunto de m operações $J_i=\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}\}$. Portanto, cada tarefa terá a sua própria rota de produção, sendo declarado qual máquina realizará cada operação e sua respectiva ordem. A Figura 7 oferece uma interpretação visual sobre o que foi explanado anteriormente.

Figura 7 – Fluxo de produção *job shop*

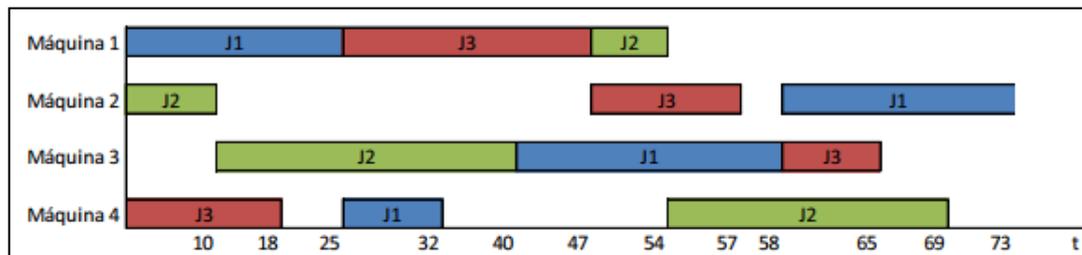


Fonte: Morales e Ronconi (2016)

Considerando que $J=\{J_1, J_2, J_3\}$, $M=\{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ e que o processo de produção de cada tarefa deve seguir: $J_1=\{O_{11}, O_{24}, O_{33}, O_{42}\}$, $J_2=\{O_{12}, O_{23}, O_{31}, O_{44}\}$ e $J_3=\{O_{14}, O_{21}, O_{32}, O_{43}\}$ fica evidenciado que cada tarefa segue um caminho único até resultar nos produtos finais C_1, C_2 e C_3 .

Já a Figura 8 apresenta uma interpretação do fluxo de produção anterior a partir do gráfico de Gantt.

Figura 8 – Gráfico de Gantt para uma programação *job shop*



Fonte: Morales (2012)

Com essa ferramenta é possível visualizar de forma ainda mais clara o processo que é seguido pelas tarefas, suas operações e como isso se distribui entre as máquinas. É possível perceber também a complexidade de ordenar de maneira otimizada as tarefas, de forma que facilmente se observa uma série de espaços em branco, que indicam a ociosidade das máquinas.

2.4.1 Modelagem Matemática do *Job shop*

Como solução para o problema de *job shop* se pode considerar a modelagem matemática realizada por Manne (1960):

Parâmetros:

n : número total de tarefas;

m : número total de máquinas;

Índices:

i : tarefas;

k : máquinas;

l : operações;

j : posições.

Parâmetros:

P_{ik} : tempo de processamento da tarefa i na máquina k ;

r_{ilk} : indica se a operação l da tarefa i requer a máquina k ;

M : número suficientemente grande.

Variáveis:

S_{ik} : instante de início da tarefa i na máquina k ;

C_{max} : valor do *makespan*, ou seja, o instante de término do processamento da última tarefa;

$$Z_{iuk} \begin{cases} 1 & \text{se a tarefa } i \text{ precede a tarefa } u \text{ na máquina } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } C_{max} \tag{1}$$

Sujeito à:

$$\sum_{k=1}^m r_{ilk} (s_{ik} + p_{ik}) \leq \sum_{k=1}^m r_{i,l+1,k} s_{ik} \quad i=1,2,\dots,n; l=1,2,\dots,m-1 \tag{2}$$

$$(M + p_{uk}) Z_{iuk} + (s_{ik} - s_{uk}) \geq p_{uk} \quad 1 \leq i < u \leq n; k = 1,2,\dots,m \tag{3}$$

$$(M + p_{ik})(1 - Z_{iuk}) + (s_{uk} - s_{ik}) \geq p_{ik} \quad 1 \leq i < u \leq n; k = 1,2,\dots,m \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^m r_{imk} (s_{ik} + p_{ik}) \leq C_{max} \quad i=1,2,\dots,n \tag{5}$$

$$s_{ik} \geq 0 \quad i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m \quad (6)$$

$$Z_{iuk} \in \{0, 1\} \quad i,u=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m \quad (7)$$

A função objetivo (1) consiste na minimização do instante de término do processamento da última tarefa (*makespan*). A restrição (2) determina que o instante de início do processamento da operação $l+1$ da tarefa i na máquina k deve ser maior que o instante de início da operação l da tarefa i na máquina k mais o seu tempo de processamento. Assim, estabelecendo a ordem de precedência das tarefas em suas respectivas máquinas.

As restrições (3) e (4) determinam a precedência das tarefas dentro de uma máquina, ou seja, caso Z_{iuk} assuma 1 a restrição (3) será desativada, já que ela será automaticamente atendida independente do valor de p_{ik} , pois terá o M do outro lado da desigualdade. Já a restrição (4) determina que o instante de início da tarefa u (situada após a tarefa i) deve ser maior que a soma do instante de início e do tempo de processamento da tarefa i . A restrição (5) determina o instante de término da última operação de cada tarefa considerando a somatória de cada instante de início de processamento (s_{ik}) mais o seu tempo de processamento (p_{ik}). Para garantir que a variável s_{ik} não assuma valores negativos é utilizada a restrição (6) e para garantir que a variável Z_{iuk} assumam somente valores binários é utilizada a restrição (7).

2.5 HEURÍSTICAS

Os métodos heurísticos por não precisar percorrer todas as soluções possíveis do problema, tentam encontrar os melhores caminhos, ou mais viáveis em tempo computacional aplicável ao dia a dia de uma indústria, através da avaliação baseada nas características do problema (CARNEIRO, 2010).

De acordo com Morales (2012), as soluções obtidas podem não ser necessariamente as ótimas para o problema, no entanto, normalmente são soluções de boa qualidade e obtidas em tempo computacional hábil. As heurísticas construtivas são adequadas para problemas de alta complexidade.

Segundo Fuchigami (2005), os métodos heurísticos para programação de tarefas se dão de diversas formas, e podem ser classificados em dois grupos distintos:

- Métodos construtivos: a partir da ordenação das tarefas segundo índices de prioridade;
- Métodos melhorativos: obtém-se uma solução inicial e, em seguida, através de algum procedimento iterativo, procura-se uma melhor programação das tarefas que a atual, de acordo com a medida de desempenho proposta.

Existem diversas regras de prioridades que podem ser aplicadas a diversos tipos de heurísticas. Para Reis (1996), embora certas regras sejam melhores, de modo geral, que outras, nenhuma regra é melhor em qualquer circunstância.

Ao longo dos anos, várias heurísticas foram desenvolvidas, adaptadas e aprimoradas. A seguir, listam-se algumas das regras mais conhecidas (CHASE, 1995, KAN 1976 apud REIS, 1996):

- *Earliest Due Date* (EDD): regra da data de entrega, prioridade maior à operação com a menor data de entrega, ou seja, a data mais próxima;
- *Slack Time Remaining* (STR): regra da menor folga, prioridade maior à operação com menor folga. A folga é dada como a diferença entre o tempo restante antes da data de entrega e o tempo de processamento restante;
- *Shortest Processing Time* (SPT): regra do menor tempo de processamento, prioridade à operação com o tempo de processamento mais curto;
- *First In First out* (FIFO): regra primeiro a entrar é o primeiro a sair, prioridade à operação que primeiro fica disponível para processamento;
- *Last In First Out* (LIFO): regra último a entrar primeiro a sair, prioridade à última operação que ficou disponível para processamento; e
- *RANDOM*: aleatório, prioridade será atribuída aleatoriamente à uma operação.

Embora essas regras possam ser as mais comuns ou genéricas, elas podem se mostrar bastante eficazes na resolução de problemas. Vale salientar que existem

diversos outros tipos de regras e métodos a serem seguidos quando se trata de heurísticas.

3 METODOLOGIA

A ciência e as pesquisas se desenvolveram a partir da necessidade de uma busca por explicações causais dos fatos ou da compreensão exaustiva da realidade, através de informações obtidas por meio da observação e outros métodos de se coletar dados que fundamentassem afirmações mais amplas (CHIAZZOTTI, 2008).

Segundo Bourguinhon (2009), a arte de pesquisar requer diversas definições prévias antes de ir a campo, iniciar uma coleta de dados e sucessivamente analisá-los. Para haver uma pesquisa de qualidade, em qualquer nível, o projeto deve estar bem alinhado em seus elementos essenciais, como objeto de pesquisa, metodologia e outros.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho pode ser classificado de diferentes modos, conforme segue.

3.1.1 Natureza

De acordo com Gil (2008), uma pesquisa pode ser classificada como aplicada quando tem o seu interesse fundamental em sua aplicação, na real utilização e consequências reais dos conhecimentos. Dado isto, o presente trabalho pode ser classificado como aplicado, pois trata de situações aplicadas ao mundo real, envolvendo modelos, hipóteses e formulações que podem facilmente serem empregadas a uma indústria ou no setor de serviços, podendo trazer benefícios reais com sua utilização.

3.1.2 Objetivos

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada tanto quanto exploratória, quanto descritiva. As pesquisas exploratórias têm como cerne desenvolver ou esclarecer um conceito, uma ideia, formulando problemas mais precisos ou alternativas pesquisáveis. São desenvolvidas para dar uma visão geral

mais ampla, aproximativo acerca de um determinado fato (GIL, 2008). Pelo fato de estar sendo trabalhado com instâncias já conhecidas da literatura e com modelos heurísticos modificados, a pesquisa se torna exploratória, buscando um maior conhecimento de um tema já estudado.

Gil (2008) define uma pesquisa descritiva tendo como principal objetivo a descrição das características de um determinado fenômeno ou a relação entre diversas variáveis que a partir de seus objetivos podem servir para proporcionar uma nova visão do problema. Tratando-se de programação de tarefas, a quantidade de variáveis postas e permutáveis tende a ser de um número altíssimo, sendo elas diferentes para cada problema estudado, podendo gerar novas observações para cada caso, dando um caráter descritivo ao estudo.

3.1.3 Procedimentos

O presente trabalho pode ser classificado como modelagem/simulação, pois os resultados só poderão ser obtidos após realização prática dos problemas formulados, através de experimentação simulada por software. Miguel et al. (2012) define modelagem/simulação como variáveis que podem ser manipuladas no modelo de pesquisa, mas não na realidade em um primeiro momento, através do uso de computadores ou não.

3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados será feita com base nos experimentos a serem realizados a partir de instâncias disponíveis para toda a comunidade. Após a utilização de um software computacional os resultados advindos do trabalho serão analisados.

3.3 OPERACIONALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Os dados obtidos na literatura serão analisados através de experimentos computacionais a partir das heurísticas já existentes, seguido de suas devidas

modificações para o problema proposto. O algoritmo irá manipular as variáveis existentes a fim de otimizar um dos critérios de otimização do trabalho.

3.4 VERIFICAÇÃO DE MELHORIA

Os resultados obtidos por meio da experimentação serão analisados e discutidos. A partir dessas análises, será possível um posicionamento e chegar à conclusão da pesquisa.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo aborda a seleção e a adaptação das instâncias, as lógicas de implementação das heurísticas e dos métodos de resolução com exemplos, os critérios para avaliação e, por fim, a comparação dos resultados.

4.1 INSTÂNCIAS

Para este estudo, foram utilizadas 40 instâncias desenvolvidas por Lawrence (1984) disponibilizadas no acervo online *ORLibrary*. Essas instâncias podem ser classificadas em função do seu número de tarefas (n) e seu número de máquinas (m), sendo agrupadas em classes a partir da relação $n \times m$. Para o número de tarefas, tem-se definido os valores 10, 15, 20 e 30 e para o número de máquinas, os valores 5, 10 e 15. Cada classe possui 5 instâncias diferentes, totalizando os 40 casos estudadas.

Como o principal foco deste estudo consiste na obtenção de melhores resultados em função do atraso das tarefas, essas 40 instâncias foram adaptadas para conter uma data de entrega e um valor de multa de atraso para cada tarefa.

Para a obtenção desses novos valores, foi utilizado o software Microsoft Excel. Os valores de multa de atraso foram definidos aleatoriamente entre 1 e 10 com a função "ALEATÓRIO". Para as datas de entrega foi utilizada a função "ALEATÓRIOENTRE", definindo como valor mínimo a multiplicação da soma dos tempos de processamento das operações da tarefa pela razão do número de tarefas pelo número de máquinas. Como valor máximo utilizou-se o valor mínimo multiplicado por 1,5. Esses limites são detalhados nas equações 8 e 9.

$$Mín = \sum_{k=1}^m P_{1k} * \frac{n}{m} \quad (8)$$

$$Máx = 1,5 * \sum_{k=1}^m P_{1k} * \frac{n}{m} \quad (9)$$

4.2 MÉTODOS

As instâncias foram utilizadas na experimentação computacional das regras de prioridade SPT, LPT e EDD que foram implementadas em dois métodos

heurísticos com lógicas diferentes, denominados Método 1 e Método 2. Ambos os métodos foram implementados em linguagem C.

As soluções são avaliadas pelos custos devidos aos atrasos de tarefas e pela duração total da programação (*makespan*).

4.2.1 Método 1

O Método 1 consiste em uma abordagem mais simples, em que é analisado o problema somente em função das suas tarefas, sendo as operações alocadas conseqüentemente. De forma que a ordenação das tarefas realizadas, para o SPT e LPT, considera-se a média do tempo de processamento de cada operação para cada tarefa. Já para o EDD, considera-se somente a data de entrega para cada tarefa. O pseudocódigo segue as iterações do Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Passos do Método 1.

1. Ordenar as tarefas em função da regra de prioridade selecionada (SPT, LPT ou EDD);
2. Enquanto houver tarefa disponível para ser alocada:
 - 2.1. Selecionar a tarefa com maior prioridade dentre as ainda disponíveis;
 - 2.2. Alocar as operações dessa tarefa em suas respectivas máquinas, seguindo seu fluxo de produção e a ordenação inicial da regra selecionada, iniciando cada operação no primeiro instante possível;
3. Avaliar a solução obtida.

Para exemplificar o método será utilizado como base o mesmo problema apresentado na Figura 8. Na Tabela 1 tem-se a distribuição das tarefas, com as máquinas em que cada operação é realizada e seu respectivo tempo de processamento.

Tabela 1 - Exemplo de Instância

	Operação 1		Operação 2		Operação 3		Operação 4	
	Máquina	P_{ik}	Máquina	P_{ik}	Máquina	P_{ik}	Máquina	P_{ik}
Tarefa 1	1	25	4	7	3	18	2	15
Tarefa 2	2	10	3	30	1	7	4	15
Tarefa 3	4	18	1	22	2	10	3	7

Fonte: Autoria própria

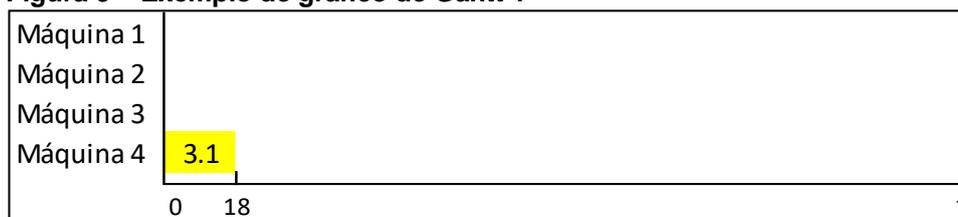
Na Tabela 2, as datas de entrega e o valor da multa, gerados aleatoriamente de acordo com o explicado anteriormente.

Tabela 2 – Datas de entrega e multa por atraso		
	Data de Entrega	Multa de Atraso
Tarefa 1	72	9
Tarefa 2	59	4
Tarefa 3	68	5

Fonte: Autoria própria

Seguindo a heurística de prioridade SPT, a ordem das tarefas resulta: 3,2 e 1. Portanto, a primeira tarefa a ser alocada será a tarefa 3, sendo a primeira operação alocada na máquina 4, do instante 0 até o instante 18, como mostra a Figura 9.

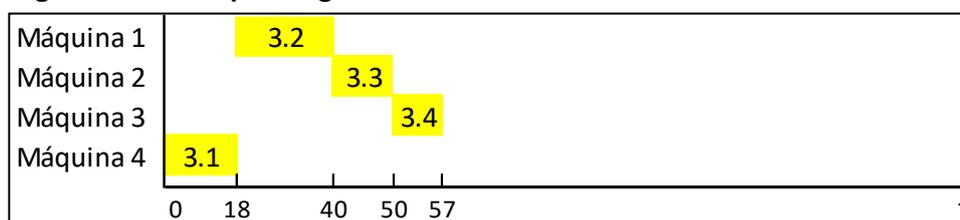
Figura 9 – Exemplo de gráfico de Gantt 1



Fonte: Autoria própria

Alocando em seguida as outras operações dessa mesma tarefa em suas respectivas máquinas respeitando o processamento da operação antecessora, a alocação da tarefa 3 é finalizada como mostra a Figura 10.

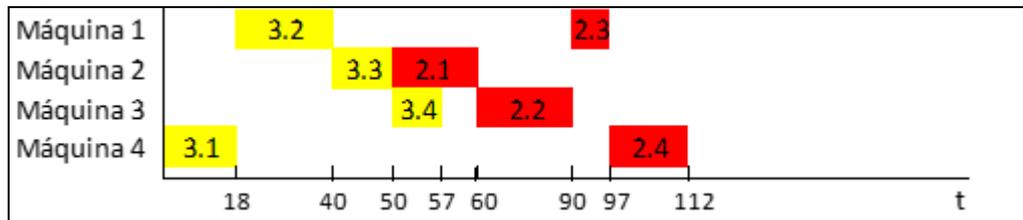
Figura 10 – Exemplo de gráfico de Gantt 2



Fonte: Autoria própria

Seguindo a ordem de prioridade a tarefa 2 é selecionada para ser alocada, tendo início no instante de término de utilização da máquina necessária para o processamento de sua primeira operação. Nesse caso, o instante 57 na máquina 2, sendo todas as outras operações alocadas respeitando a metodologia exemplificada anteriormente, podendo visualizar o resultado final conforme a Figura 11.

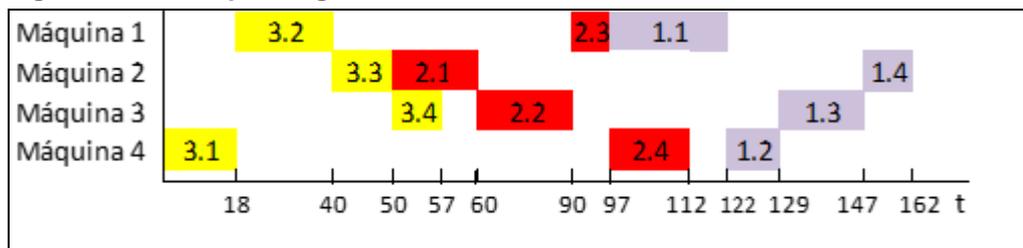
Figura 11 – Exemplo de gráfico de Gantt 3



Fonte: Autoria própria

Para a alocação da última tarefa, o processo se repete, tendo início no instante 97, na máquina 1, da mesma forma que as outras operações, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de gráfico de Gantt 4



Fonte: Autoria própria

Considerando as datas de entrega e os valores das multas por atraso essa ordenação resultou em duas tarefas com atraso e em um custo total de 894 unidades monetárias.

4.2.2 Método 2

O segundo método consiste em uma abordagem mais refinada, baseada no algoritmo de Scrich (1997) e nas regras de despacho apresentadas por Pinedo (2008).

Como regra para priorização de tarefas considerou-se para cada heurística:

- SPT: Selecionar a operação disponível para a máquina com menor tempo de processamento;
- LPT: Selecionar a operação disponível para a máquina com maior tempo de processamento;
- EDD: Selecionar a operação disponível para a máquina com a data de entrega mais próxima.

Para compreender o algoritmo, deve-se inicialmente considerar: T como o instante para tentativa de alocação de uma operação; $t[k]$ como instante de disponibilidade da máquina k ; $L[k]$ como indicador de disponibilidade da máquina k , sendo que $L[k]=1$ indica máquina disponível e $L[k]=0$, máquina não disponível; $D[i]$ como o instante de finalização de processamento da última operação alocada da tarefa i ; m como o número de máquinas; n como número total de tarefas; e G como um número grande.

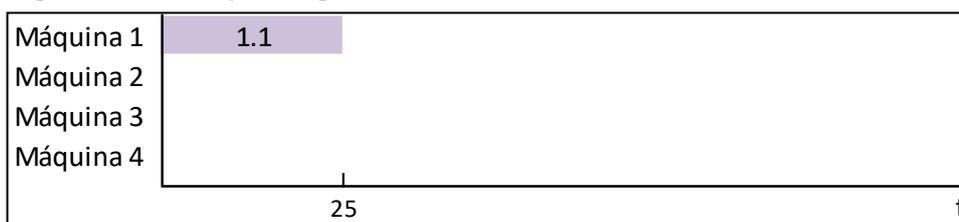
Algoritmo 2: Passos do Método 2.

1. Faça $t[k] = 0$, $L[k]=0$ para $k=1, \dots, m$; $D[i]=0$ para $i=1, \dots, n$; e estabeleça $T=0$ e $k=1$;
2. Enquanto houver operações a serem alocadas;
 - 2.1 Se $t[k] \leq T$ ou $L[k] = 1$;
 - 2.1.1. Se existe tarefa que possa ser alocada na máquina k no momento T ;
 - 2.1.1.1 Calcular a regra de despacho seguindo a heurística selecionada;
 - 2.1.1.2 Alocação da operação da tarefa i com maior prioridade na máquina k no maior instante entre $t[k]$ e $d[i]$;
 - 2.1.1.3 Atualizar valores de $D[i]$ e $t[k]$;
 - 2.1.1.4 Fazer $L[k] = 0$;
 - 2.1.1.5 Atualizar o número de operações alocadas;
 - 2.1.2 Se não existe nenhuma tarefa que possa ser alocada, a máquina k deve ser penalizada indicando $t[k]=G$ e $L[k]=1$;
 - 2.2 Se a máquina k não tiver disponibilidade no tempo T e $L[k] = 0$, manter $L[k] = 0$;
 - 2.3 Atualizar T , considerando o menor valor de $T[u]$, para $u=1, \dots, m$.
3. Avaliar a solução obtida.

Aplicando o mesmo exemplo utilizado para o Método 1, temos:

Para a máquina 1, a operação disponível com menor tempo de processamento é a operação 1 da tarefa 1, já que não há outra tarefa disponível para ser executada nessa máquina. Os resultados da alocação são mostrados na Figura 13.

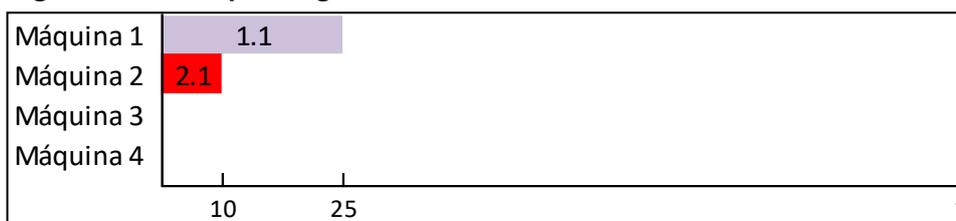
Figura 13 – Exemplo de gráfico de Gantt 5



Fonte: Autoria própria

Neste momento o valor de $t[1]$ é atualizado para 25, o valor de $D[1]$ é atualizado para 25 e $L[1]$ recebe valor 0. Como a máquina 2 ainda apresenta $t[2]$ igual a 0, não é realizada a atualização de T , e a máquina 2 é selecionada. Com isso a operação 1 da tarefa 2 é alocada na máquina 2. O resultado pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de gráfico de Gantt 6



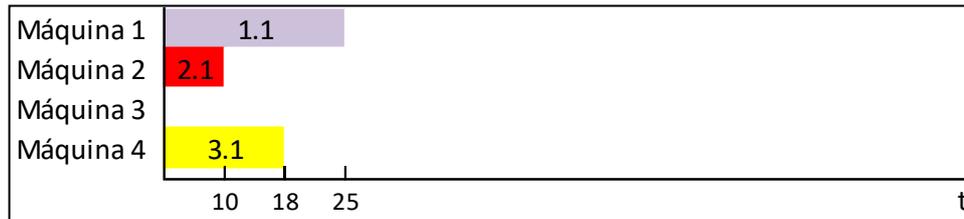
Fonte: Autoria própria

O instante em que a máquina 2 estará novamente disponível, $t[2]$, assume o valor 10, o instante em que a tarefa 2 estará novamente disponível, $D[2]$, é atualizado para 10 e a máquina 2 se torna indisponível com $L[2]$ assumindo o valor 0.

Novamente, é realizada a atualização do instante T , mas a máquina 3 ainda está disponível, sendo o valor de $t[3]$ igual a 0, sendo ela selecionada. Como nenhuma tarefa pode ser alocada nela, pois no instante $T=0$ a tarefa 2 ainda está sendo processada na máquina 2, $t[3]$ recebe um numero grande, G , e passa a estar indisponível com $L[3]=1$.

É realizada nova atualização de T , em que a máquina 4 é selecionada por ainda possuir $t[4]$ com valor igual a 0. A tarefa disponível para alocação nela é a 3, com instante de finalização 18, de forma que o valor de $t[4]$ é atualizado para 18, o valor de $D[3]$ é atualizado para 18 e $L[4]$ recebe 0, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de gráfico de Gantt 7

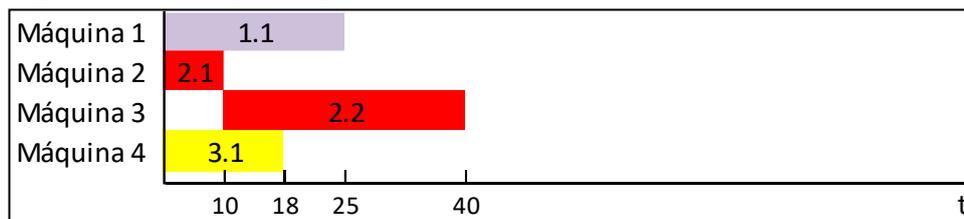


Fonte: Autoria própria

Como $f[3]=G$, T assumirá $f[2]=10$ como novo valor. A primeira máquina disponível para $T=10$ é a máquina 2, mas como não existe nenhuma tarefa disponível para ser alocada, $f[2]$ assume o valor de G e $L[2]=1$;

A próxima máquina disponível será a máquina 3 e estará vaga no instante $T=10$, que contém $L[3]=1$. Para ela, a tarefa disponível com menor tempo de processamento, é a operação 2 da tarefa 2, mostrado na Figura 16.

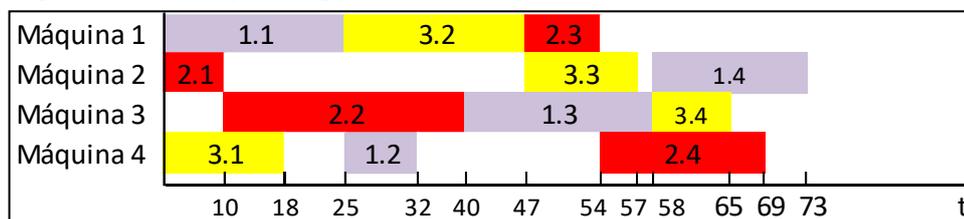
Figura 16 – Exemplo de gráfico de Gantt 8



Fonte: Autoria própria

Esse processo se repete até que todas as operações de todas as tarefas sejam alocadas, finalizando o gráfico de Gantt mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Exemplo de gráfico de Gantt final



Fonte: Autoria própria

Essa nova ordenação resultou em duas tarefas com atraso, mas com um custo total de 89 unidades monetárias, reduzindo consideravelmente a ociosidade das máquinas.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente trabalho buscou trabalhar com dois critérios de avaliação: um principal sendo a redução do custo de atraso de entrega das tarefas e um secundário tratando da redução do tempo total de programação das tarefas, ou *makespan*. Com a aplicação dos métodos heurísticos buscando minimizar o valor do critério de avaliação em ambos os cenários, foram obtidos bons resultados em tempos computacionais aceitáveis. Em todo o caso, para este estudo o tempo computacional não será levado em consideração, visto que o mesmo foi relativamente muito próximo em todos os casos, com um tempo médio de 8 segundos para solucionar todas as instâncias.

Os critérios de avaliação foram calculados nos próprios métodos utilizados, gerando um arquivo de saída com os valores de custo total por atraso e *makespan*, então transferidos para uma planilha eletrônica no software Microsoft Excel para análise.

Os experimentos computacionais foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-3537U 2.00GHz, com memória RAM 8GB e sistema operacional Windows 10, com arquitetura 64 bits.

5.1 ANÁLISE DOS CUSTOS DE ATRASO

No Método 1 foram obtidos os valores monetários de atraso para cada instância, onde para cada uma delas foram aplicados três métodos de ordenação de tarefas diferentes: SPT, LPT e EDD. Os resultados podem ser vistos no Quadro 6.

Os valores em destaque representam a melhor solução, no caso, o menor custo de atraso gerado para cada regra de ordenação aplicada.

Tabela 3 – Custos de atraso Método 1

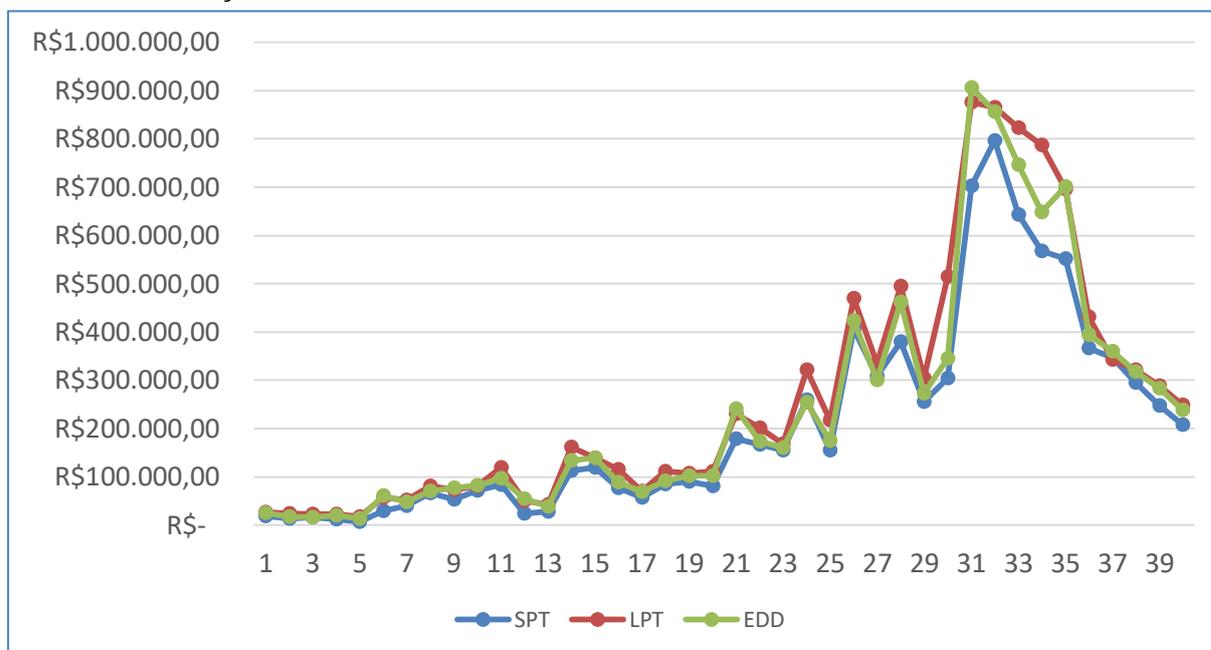
Informações		Custo de Atraso Método 1 (R\$)		
Instância	Tamanho da Instância	SPT	LPT	EDD
1	10 x 5	18.420,00	27.100,00	26.156,00
2	10 x 5	14.030,00	24.437,00	17.842,00
3	10 x 5	16.389,00	23.172,00	16.637,00
4	10 x 5	12.755,00	22.864,00	20.756,00
5	10 x 5	6.472,00	17.348,00	13.877,00
6	15 x 5	29.540,00	57.600,00	61.649,00
7	15 x 5	40.442,00	52.296,00	47.721,00
8	15 x 5	65.892,00	80.700,00	71.002,00
9	15 x 5	53.830,00	73.558,00	76.477,00
10	15 x 5	71.317,00	81.477,00	81.737,00
11	20 x 5	83.549,00	118.969,00	96.344,00
12	20 x 5	23.994,00	50.231,00	54.786,00
13	20 x 5	27.673,00	42.636,00	38.166,00
14	20 x 5	113.363,00	161.812,00	134.384,00
15	20 x 5	119.751,00	138.599,00	138.799,00
16	10 x 10	76.800,00	115.925,00	89.286,00
17	10 x 10	57.582,00	70.647,00	69.097,00
18	10 x 10	85.118,00	111.446,00	91.180,00
19	10 x 10	90.840,00	106.854,00	102.328,00
20	10 x 10	81.658,00	111.277,00	101.904,00
21	15 x 10	178.868,00	230.929,00	241.660,00
22	15 x 10	167.340,00	201.795,00	173.388,00
23	15 x 10	154.684,00	168.043,00	160.432,00
24	15 x 10	259.302,00	322.337,00	254.078,00
25	15 x 10	155.685,00	217.847,00	174.720,00
26	20 x 10	406.126,00	469.592,00	422.945,00
27	20 x 10	308.303,00	334.458,00	301.006,00
28	20 x 10	380.535,00	495.554,00	461.684,00
29	20 x 10	255.177,00	304.184,00	272.594,00
30	20 x 10	304.679,00	514.723,00	345.927,00
31	30 x 10	703.034,00	875.538,00	905.755,00
32	30 x 10	796.036,00	865.232,00	855.641,00
33	30 x 10	642.641,00	823.465,00	746.396,00
34	30 x 10	567.203,00	787.198,00	647.877,00
35	30 x 10	551.584,00	695.592,00	700.763,00
36	15 x 15	366.084,00	431.458,00	393.975,00
37	15 x 15	347.335,00	343.341,00	360.184,00
38	15 x 15	295.557,00	322.274,00	317.965,00
39	15 x 15	247.681,00	288.500,00	283.555,00
40	15 x 15	208.395,00	248.974,00	238.617,00

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 3 é possível perceber que a heurística que obteve melhores resultados foi a SPT, com um total de 37, seguida pela EDD com 2 melhores resultados e LPT com 1.

No Gráfico 1 é exposto a variação dos custos de atraso para o Método 1.

Gráfico 1 – Variação dos custos de atraso - Método 1



Fonte: Autoria própria

Observando a Tabela 3 e o Gráfico 1 nota-se que no Método 1 a regra de prioridade SPT obteve vantagem em relação às regras LPT e EDD. Neste primeiro cenário, apesar do sucesso da heurística SPT, a diferença de valores permanece próxima e não gerando diferenças conforme o número de máquinas ou tarefas aumenta. Nota-se também que nos casos em que a regra SPT não apresenta melhores resultados, ela está bem próxima do melhor valor obtido pelas suas concorrentes.

É possível analisar que, devido à maneira de alocação utilizada por este Método, existe uma quantidade significativa de espaços de tempo entre o fim e o início das operações alocadas. Resultando em uma quantidade de multas de atraso, como por exemplo, R\$ 796.036,00 na instância 32 apresentado como melhor solução entre as heurísticas utilizadas.

Em um segundo cenário desenvolvido apresenta-se os resultados do Método 2. Os valores das multas por atraso deste método podem ser vistos na Tabela 4, em que os valores nulos são representados por traço.

Tabela 4 – Custos de atraso Método 2

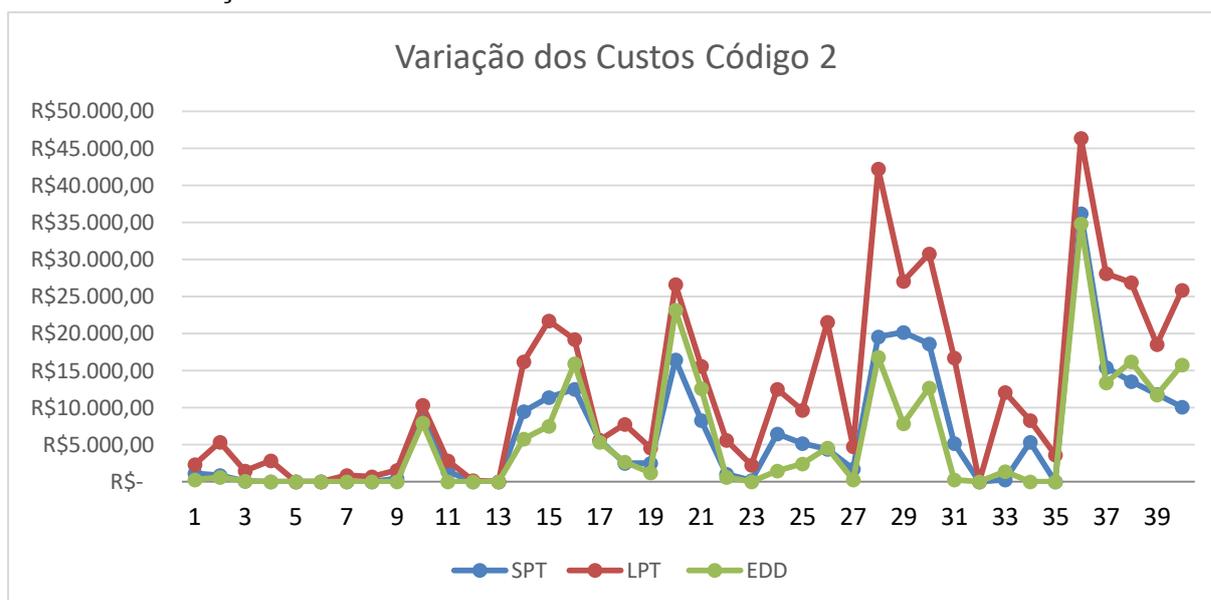
Informações		Custo de Atraso Método 2 (R\$)		
Instância	Tamanho da Instância	SPT	LPT	EDD
1	10 x 5	1.096,00	2.307,00	227,00
2	10 x 5	834,00	5.318,00	557,00
3	10 x 5	52,00	1417	54,00
4	10 x 5	-	2.812,00	-
5	10 x 5	-	-	-
6	15 x 5	-	-	-
7	15 x 5	-	829,00	-
8	15 x 5	-	720,00	-
9	15 x 5	396,00	1.544,00	-
10	15 x 5	8.499,00	10.309,00	7.900,00
11	20 x 5	1.330,00	2.851,00	-
12	20 x 5	-	126,00	-
13	20 x 5	-	-	-
14	20 x 5	9.431,00	16.181,00	5.782,00
15	20 x 5	11.380,00	21.700,00	7.527,00
16	10 x 10	12.468,00	19.163,00	15.885,00
17	10 x 10	5.601,00	5.561,00	5.291,00
18	10 x 10	2.506,00	7.726,00	2.623,00
19	10 x 10	2.495,00	4.596,00	1.172,00
20	10 x 10	16.471,00	26.653,00	23.178,00
21	15 x 10	8.237,00	15.553,00	12.529,00
22	15 x 10	994,00	5.582,00	588,00
23	15 x 10	182,00	2.256,00	-
24	15 x 10	6.466,00	12.464,00	1.483,00
25	15 x 10	5.136,00	9.609,00	2.386,00
26	20 x 10	4.409,00	21.556,00	4.576,00
27	20 x 10	1.700,00	4.770,00	260,00
28	20 x 10	19.556,00	42.180,00	16.758,00
29	20 x 10	20.116,00	27.071,00	7.824,00
30	20 x 10	18.578,00	30.716,00	12.666,00
31	30 x 10	5.126,00	16.744,00	210,00
32	30 x 10	-	-	-
33	30 x 10	246,00	12.044,00	1.368,00
34	30 x 10	5.329,00	8.247,00	-
35	30 x 10	-	3.572,00	-
36	15 x 15	36.187,00	46.321,00	34.767,00
37	15 x 15	15.438,00	28.045,00	13.308,00
38	15 x 15	13.556,00	26.906,00	16.197,00
39	15 x 15	11.828,00	18.543,00	11.700,00
40	15 x 15	10.097,00	25.830,00	15.770,00

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 4 é possível perceber que a heurística que obteve melhores resultados foi a EDD, com um total de 31, seguida pela SPT com 18 melhores resultados e LPT com 4. Deve-se considerar que, nos casos em que mais de uma regra de prioridade obteve resultados iguais, todas foram consideradas melhores resultados.

No Gráfico 2 é apresentado a variação dos custos de atraso para o Método 2.

Gráfico 2 – Variação dos custos de atraso - Método 2



Fonte: Autoria própria

É perceptível que para o Método 2 a regra de prioridade EDD obtêm vantagem frente às outras. Em algumas instâncias observa-se também que as heurísticas empatam com valor de multa por atraso sendo R\$ 0,00. Ou seja, nenhuma tarefa atrasou a sua entrega, o que mostra o melhor cenário possível para o estudo aqui realizado.

Pode-se compreender o melhor desempenho da regra de heurística EDD devido à alocação prioritária de tarefas com menor tempo de entrega, de modo que ela seja a heurística mais adequada para o a redução do custo do atraso, o critério de avaliação considerada nessa etapa.

A redução dos valores obtidos para os custos de multa do Método 2 para o Método 1 se mostra de maneira significativa. Isto se deve ao fato da melhoria da alocação das operações das tarefas nas máquinas. No Método 2, as máquinas passam a não ficar mais tanto tempo ociosas. Isso representa de melhor maneira a

real situação de uma fábrica ou empresa no seu cotidiano, que está sempre em busca de trabalhar na máxima eficiência de suas máquinas.

5.2 ANÁLISE DO *MAKESPAN*

De maneira análoga à redução dos custos de atraso de entrega das tarefas, foi analisado o *makespan* para cada instância, seguindo as mesmas regras de prioridade SPT, LPT e EDD.

Em destaque verde no Quadro 8 encontra-se os melhores resultados obtidos, ou seja, as instâncias que obtiveram os menores *makespans* para cada regra aplicada utilizando o Método 1.

Tabela 5 – *Makespan* Método 1

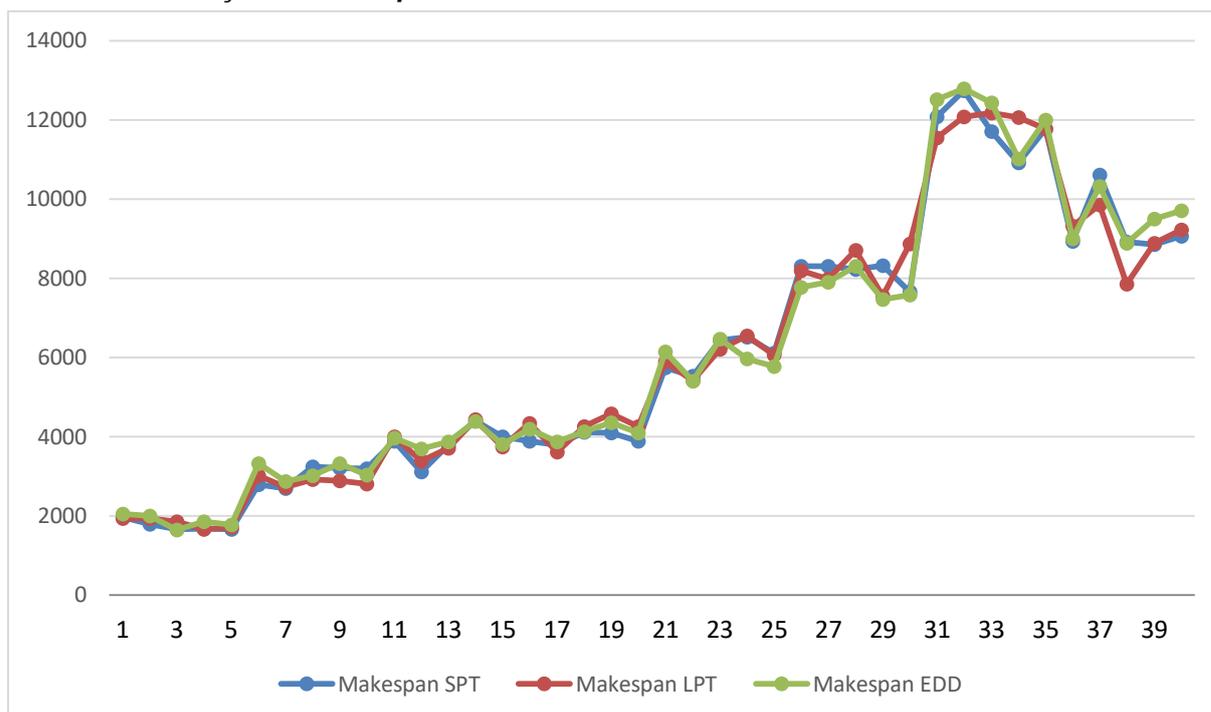
Informações		<i>Makespan</i> Método 1		
Instância	Tamanho da Instância	<i>Makespan</i> SPT	<i>Makespan</i> LPT	<i>Makespan</i> EDD
1	10 x 5	1964	1928	2044
2	10 x 5	1776	1927	1994
3	10 x 5	1660	1849	1644
4	10 x 5	1677	1649	1846
5	10 x 5	1654	1695	1772
6	15 x 5	2788	3005	3317
7	15 x 5	2685	2724	2865
8	15 x 5	3235	2909	3015
9	15 x 5	3210	2887	3323
10	15 x 5	3193	2792	3020
11	20 x 5	3887	3989	3966
12	20 x 5	3101	3382	3691
13	20 x 5	3780	3711	3857
14	20 x 5	4391	4426	4374
15	20 x 5	3997	3740	3801
16	10 x 10	3875	4338	4194
17	10 x 10	3776	3609	3862
18	10 x 10	4103	4250	4129
19	10 x 10	4087	4573	4347
20	10 x 10	3881	4258	4085
21	15 x 10	5733	5876	6135
22	15 x 10	5525	5419	5392
23	15 x 10	6426	6203	6466
24	15 x 10	6510	6543	5969
25	15 x 10	6104	6063	5775
26	20 x 10	8303	8192	7763
27	20 x 10	8293	7983	7890
28	20 x 10	8224	8705	8301
29	20 x 10	8318	7542	7468
30	20 x 10	7653	8863	7578
31	30 x 10	12075	11542	12509
32	30 x 10	12743	12079	12778
33	30 x 10	11702	12164	12434
34	30 x 10	10920	12055	11009
35	30 x 10	11765	11768	11996
36	15 x 15	8929	9312	9000
37	15 x 15	10599	9844	10313
38	15 x 15	8912	7848	8886
39	15 x 15	8844	8881	9495
40	15 x 15	9061	9212	9702

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5 é possível visualizar que a regra de prioridade que apresentou melhores resultados foi a SPT, com um total de 18, seguida da LPT com 13 melhores resultados e, por fim, EDD com um total de 9.

No Gráfico 3 pode ser observado a variação do *makespan* para cada instância.

Gráfico 3 – Variação do *makespan* - Método 1



Fonte: Autoria própria

Para o Método 1 observa-se que a regra SPT obteve os melhores resultados de *makespan*, o que se mostra coerente com a proposta dessa heurística, tendo em vista que com a alocação priorizando operações com menores tempos de processamento é possível obter menores *makespans*.

É possível analisar novamente que, devido à ineficiência desse método em lidar com os espaços de tempo entre as operações, é refletido diretamente nos altos valores de *makespan*, ficando ainda mais visível conforme o número de tarefas aumenta.

De forma análoga ao critério de otimização anterior, um segundo Método também foi desenvolvido para análise do *makespan*. O Quadro 9 apresenta os resultados do *makespan* para as regras de prioridade SPT, LPT e EDD para o Método 2.

Tabela 6 – *Makespan* Método 2

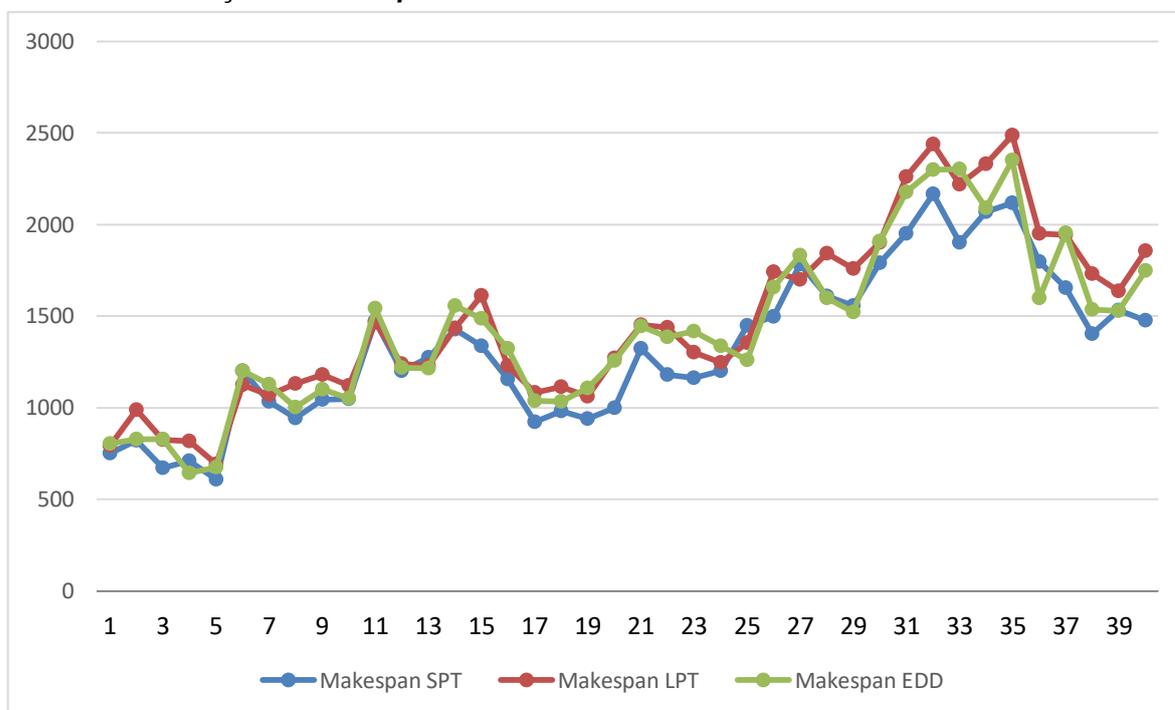
Informações		<i>Makespan</i> Método 2		
Instância	Tamanho da Instância	<i>Makespan</i> SPT	<i>Makespan</i> LPT	<i>Makespan</i> EDD
1	10 x 5	751	792	803
2	10 x 5	821	990	830
3	10 x 5	672	825	829
4	10 x 5	711	818	645
5	10 x 5	610	693	675
6	15 x 5	1200	1125	1203
7	15 x 5	1034	1069	1129
8	15 x 5	942	1130	1002
9	15 x 5	1045	1180	1099
10	15 x 5	1049	1121	1051
11	20 x 5	1473	1467	1542
12	20 x 5	1203	1240	1218
13	20 x 5	1275	1230	1215
14	20 x 5	1427	1434	1556
15	20 x 5	1339	1612	1486
16	10 x 10	1156	1229	1322
17	10 x 10	924	1082	1036
18	10 x 10	981	1114	1033
19	10 x 10	940	1062	1109
20	10 x 10	1000	1272	1257
21	15 x 10	1324	1451	1446
22	15 x 10	1180	1440	1387
23	15 x 10	1162	1302	1416
24	15 x 10	1203	1245	1339
25	15 x 10	1449	1354	1259
26	20 x 10	1498	1741	1658
27	20 x 10	1784	1699	1831
28	20 x 10	1610	1844	1598
29	20 x 10	1556	1759	1521
30	20 x 10	1792	1902	1910
31	30 x 10	1951	2261	2178
32	30 x 10	2165	2437	2298
33	30 x 10	1901	2218	2302
34	30 x 10	2070	2330	2090
35	30 x 10	2118	2488	2352
36	15 x 15	1799	1949	1600
37	15 x 15	1655	1944	1954
38	15 x 15	1404	1732	1535
39	15 x 15	1534	1638	1530
40	15 x 15	1476	1856	1747

Fonte: Autoria própria

No Tabela 6 é possível visualizar novamente que a regra de prioridade que apresentou melhores resultados foi a SPT, com um total de 30, seguida da EDD com 7 melhores resultados e, por fim, LPT com um total de 3.

E, por último, o Gráfico 4 nos mostra a variação do *makespan* para todas as instâncias trabalhadas.

Gráfico 4 – Variação do *makespan* - Método 2

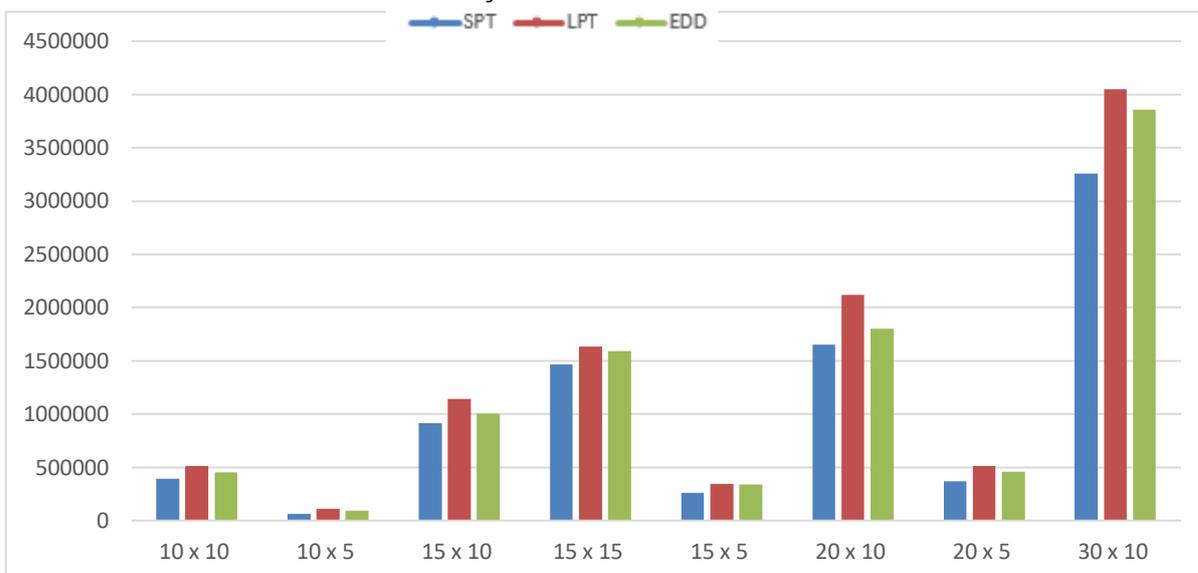


Fonte: Autoria própria

O Método 2, como pode-se observar, apresenta resultados extremamente significativos para a redução do *makespan* para a regra de prioridade SPT, passando de 18 para 30 vezes em que se obteve o melhor resultado em relação ao Método 1.

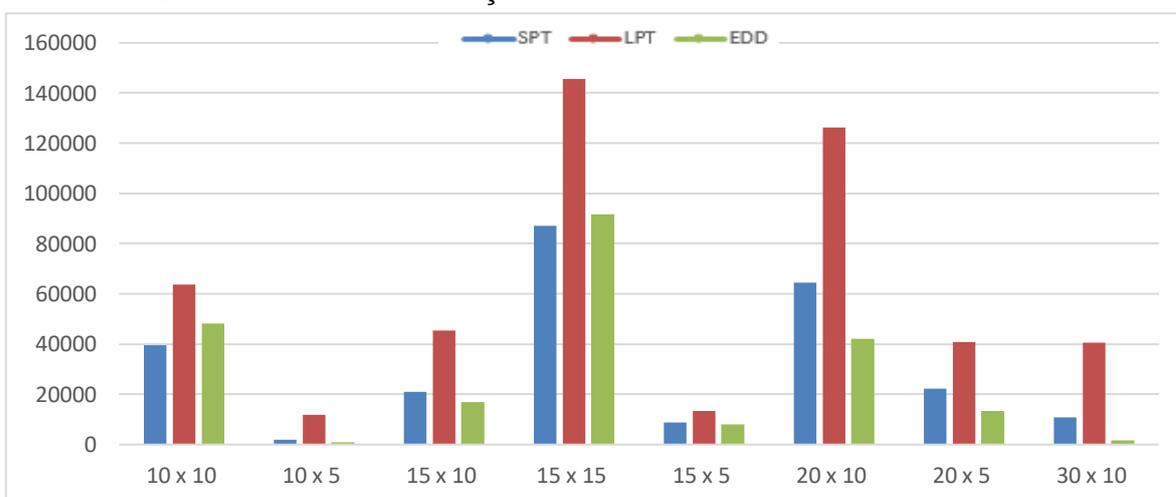
Isso se deve ao fato de que a heurística SPT é de fato voltada a redução do *makespan* das máquinas, atrelado a adaptação do desenvolvimento do código do Método 1 em relação a diminuição do tempo ocioso das máquinas, foi possível gerar resultados cada vez melhores.

Nos Gráfico 5 e 6 é exposto como o tamanho das instâncias influenciou os resultados dos custos de atraso para o Método 1 e 2, respectivamente.

Gráfico 5 – Soma dos Custos em relação ao tamanho da instância Método 1

Fonte: Autoria própria

É possível perceber que, mantendo o número de máquinas constante, aumentado somente o número de tarefas, o valor de custo de atraso tende a gerar um leve aumento. Enquanto o aumento no número de máquinas tende a um maior impacto no custo de atraso, devido ao número de operações estar ligado diretamente ao número de máquinas, ou seja, uma tarefa de uma instância 15x5, contém 5 operações, já uma tarefa 15x15 contém 15 operações. Vale destacar também que para todas as instâncias a ordem de desempenho foi SPT. EDD e LPT, do melhor ao pior respectivamente.

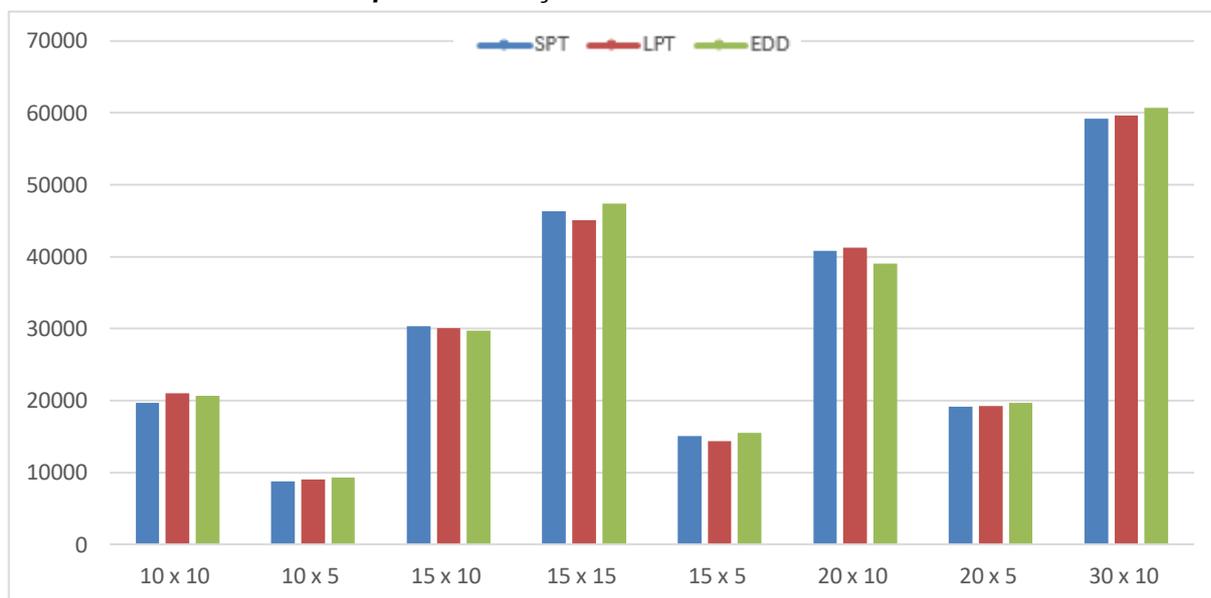
Gráfico 6 – Soma dos Custos em relação ao tamanho da instância Método 2

Fonte: Autoria própria

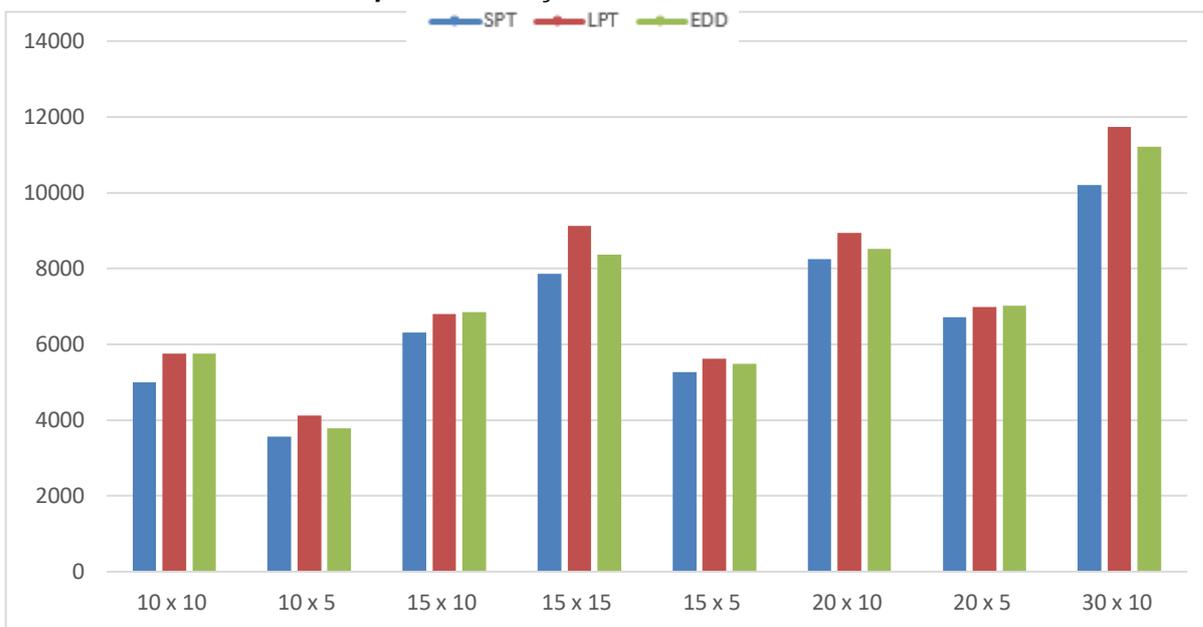
O padrão observado no Gráfico 5 não foi possível de observar no Gráfico 6, de modo que existiu variações tanto do desempenho variando entre o tamanho das instâncias, quanto o desempenho dos métodos heurísticos para cada tipo de instância, mas é possível analisar que para instâncias quadradas, ou seja, com número de tarefas igual ao número de máquinas, SPT teve um desempenho melhor, enquanto para situações em que o número de tarefas é maior que o número de máquinas o método EDD apresentou desempenho superior.

Já nos Gráficos 7 e 8 pode-se observar como o tamanho das instâncias influenciou o *makespan* para os métodos 1 e 2 respectivamente.

Gráfico 7 – Soma dos *makespans* em relação ao tamanho da instância Método 1



Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 – Soma dos *makespans* em relação ao tamanho da instância Método 2

Fonte: Autoria própria

De forma similar a análise dos custos por atraso, os Gráficos 7 e 8 também são influenciados pelo tamanho das instâncias de forma que, com um mesmo número de tarefas, maiores serão os *makespans* conforme se aumenta o número de máquinas.

Tanto os valores monetários quanto os tempos de *makespan* variam significativamente entre os Métodos 1 e 2, deixando claro a diferença de poder de ação dos métodos heurísticos implementados e como sempre pode-se buscar outros métodos de resolução, implementando heurísticas construtivas cada vez melhores.

6 CONCLUSÕES

O estudo dos problemas de programação de tarefas através de experimentos computacionais, como mostrados, pode ser de grande valia devido às suas oportunidades de aplicação e real utilização, podendo gerar importantes informações para um cenário competitivo de uma empresa. Apesar de nem sempre trazerem soluções ótimas, as experimentações trazem resultados de boa qualidade e o constante aperfeiçoamento dos métodos heurísticos aplicados podem gerar resultados cada vez melhores, como expostos nos Métodos 1 e 2.

O objetivo deste trabalho foi analisar, dentre as heurísticas conhecidas na literatura, algumas capazes de obter, com rapidez, soluções de qualidade para um ambiente de produção *job shop*, seguindo os critérios de minimização do custo por multa de atraso e do *makespan*. As aplicações das regras de prioridade SPT, LPT e EDD ao problema de *job shop* foram comparadas em duas versões de métodos distintos seguindo os mesmos critérios de avaliação.

Após os testes computacionais pode-se verificar que a heurística SPT obteve melhor resultado no Método 1 para a redução de multa por atraso e também na redução do *makespan* tanto para o Método 1 quanto para o Método 2. A heurística EDD se mostrou superior quanto à redução do custo de multa por atraso para o Método 2. Portanto, para este estudo pode-se concluir que a regra de prioridade SPT se mostra mais eficiente para resolver o problema proposto.

Também pode-se notar a melhoria quando são comparados os resultados do Método 1 com os do Método 2. O modo como são feitas as distribuições das operações das tarefas pelas máquinas gera um significativo impacto em todos os cenários mostrados, apresentando resultados financeiros de centenas de milhares de reais e de melhorias maiores que 600% na redução do *makespan*.

Este trabalho e seus resultados são importantes para estudos futuros, com a adaptação das heurísticas aqui apresentadas aos problemas reais encontrados nos diversos segmentos de negócios, é possível gerar vantagens significativas em cenários competitivos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução a pesquisa operacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2000.

BAKER, K. R. **Introduction to sequencing and scheduling**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1974. 305 p.

BOURGUIGNON, J. A. **Pesquisa social: reflexões teóricas e metodológicas**. Ponta Grossa: Todapalavra, 2009.

CARNEIRO, F. M. **Avaliação de métodos heurísticos para a solução do problema de programação *flow shop* com tempos de setup assimétricos e dependentes da sequencia**. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2010.

CHIAZZOTTI, A. **Pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais**. 2. ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

DAUZERE-PERES, S.; LASSERRE, J. On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. **International Transactions In Operational Research**, [s.l.], v. 9, n. 6, p.779-793, nov. 2002. Wiley-Blackwell.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. São Paulo: Atlas, 2010.

FERREIRA, A. H. **Proposta de um modelo em programação linear para a solução de problemas de sistemas produtivos *job shop* com setup dependentes da sequência**. 2012. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Departamento de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FUCHIGAMI, H. Y. **Métodos heurísticos construtivos para o problema de programação da produção em sistemas *flow shop* híbridos com tempos de preparação das máquinas assimétricos e dependentes da sequencia**. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2005.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. Sao Paulo: Cengage Learning, 2002.

GANTT, H. L. **Organizing for work**. New York: Harcour, Brace And Howe, 1919. 120 p.

GANTT, H. L. **Work, wages, and profits**. 2. ed. New York: The Engineering Magazine Co, 1919. 336 p.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. S. **Introdução a pesquisa operacional**. Tradução Ariovaldo Griesi. 8. ed. Sao Paulo: Mcgraw-hill, 2006.

LAWRENCE, S., **Supplement to resource constrained project scheduling**: Na experimental investigation of heuristic scheduling techniques, Technical Report, Carnegie Mellon University, GSIA, Estados Unidos, 1984.

LEUNG, J. Y-t.. **Handbook of scheduling**: Algorithms, models, and performance analysis. [s.l.]: Chapman & Hall/CRC, 2004. 1157 p.

MACCARTHY, B. L.; LIU, J. Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. **International Journal Of Production Research**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.59-79, jan. 1993. Informa UK Limited.

MANNE, Alan S.. **On the Job-Shop Scheduling Problem**. Operations Research, [s.l.], v. 8, n. 2, p.219-223, abr. 1960. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS).

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Prod e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: Abepro, 2012.

MORALES, S. G.; RONCONI, D. P. **Formulações matemáticas e estratégias de resolução para o problema *job shop* clássico**. Production, [s.l.], v. 26, n. 3, p.614-625, 22 dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

MORALES, S. G. **Formulações Matemáticas e Estratégias de Resolução para o problema de *job shop* clássico**. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, algorithms, and systems**. 3. ed. New York: Springer, 2008. 662 p.

REIS, J.. **Uma introdução ao Scheduling**. 32 f. Relatório Interno ISCTE-DCTI, Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação do I.S.C.T.E. Portugal, Lisboa, 1996.

SHARMA, P.; JAIN, A. **A review on *job shop* scheduling with setup times**. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.], v. 230, n. 3, p.517-533, 19 jan. 2015. SAGE Publications.

SCRICH, C. R. **Busca tabu para a programação de tarefas em *job shop* com datas de entrega**, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1997.

SLACK, N. et al. **Administração da produção**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Tradução Arlete Simille Marques.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: Teoria e Prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

WANG, W; BRUNN, P. **An effective genetic algorithm for *job shop* scheduling**. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, [s.l.], v. 214, n. 4, p.293-300, abr. 2000. SAGE Publications.