

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

**ANDRE LUIZ VALENTIM FLIZICOSKI**

**APLICAÇÃO DA MINIMIZAÇÃO DO ATRASO TOTAL EM AMBIENTE  
DE MÁQUINA ÚNICA COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA  
SEQUÊNCIA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2017**

**ANDRE LUIZ VALENTIM FLIZICOSKI**

**APLICAÇÃO DA MINIMIZAÇÃO DO ATRASO TOTAL EM AMBIENTE  
DE MÁQUINA ÚNICA COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA  
SEQUÊNCIA**

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**

**2017**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa

DAENP  
Coordenação de Engenharia de Produção  
Engenharia de Produção



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**APLICAÇÃO DA MINIMIZAÇÃO DO ATRASO TOTAL EM AMBIENTE DE MÁQUINA ÚNICA COM TEMPOS DE SETUP DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA**

por

**ANDRE LUIZ VALENTIM FLIZICOSKI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado(a) em 23 de novembro de 2017 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.

---

Everton Luiz de Melo  
Prof. Orientador

---

Fábio José Ceron Branco  
Membro titular

---

Yslene Rocha Kachba  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## RESUMO

FLIZICOSKI, A.L.V. **APLICAÇÃO DA MINIMIZAÇÃO DO ATRASO TOTAL EM AMBIENTE DE MÁQUINA ÚNICA COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA.** 2017. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

O presente estudo busca otimizar o sequenciamento de tarefas em um contexto de um ambiente de máquina única com tempo de *setup* dependente da sequência com o propósito de minimizar o atraso total das tarefas entregues. O ambiente produtivo real analisado é considerado como *flow shop*. Porém, devido ao fato de uma das máquinas ser um forte gargalo do sistema, este estudo aborda tal situação como um ambiente com apenas uma única máquina. Os métodos de resolução utilizados são provenientes da pesquisa operacional e do planejamento e controle da produção. Eles envolvem experimentos com modelagem matemática e heurísticas construtivas. A análise dos dados gerados pelos métodos torna possível a elaboração de um plano de melhoria para o sequenciamento das tarefas.

**Palavras-chave:** Sequenciamento de Tarefas. *Setup* Dependente. Heurísticas.

## **ABSTRACT**

FLIZICOSKI, A.L.V. **MINIMIZATION OF THE TOTAL TARDINESS IN A SINGLE MACHINE WITH DEPENDENT SETUP TIME**. 2017. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Federal Technology University – Parana. Ponta Grossa, 2017.

This study aims to minimize the total tardiness in a single machine with dependent sequence setup time environment. The productive environment is considered as flow shop; however, one machine is considered the system bottleneck. So, this study considers only the utilization of a single machine. The methods come from Operations Research, and Production Control Planning fields. The data analysis becomes possible the elaboration of an improvement plan to schedule tasks in the future.

**Keywords:** Scheduling. Dependent Setup Time. Heuristics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo gráfico de Gantt em ambiente de máquina única.....	16
Figura 2 – Exemplo gráfico de Gantt em ambiente de máquina única.....	19
Figura 3 - Gráfico de Gantt máquina única 1.....	22
Figura 4 - Gráfico de Gantt máquina única 2.....	22
Figura 5 - Gráfico de Gantt Máquinas Paralelas.....	23
Figura 6 - <i>Gráfico de Gantt Job Shop</i> .....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos de processamento .....	18
Tabela 2 – Resultado dos Critérios de Sequenciamento .....	20
Tabela 3 - Tempos de máquina.....	24
Tabela 4 - Tempos de <i>setup</i> entre grupos de tarefas.....	38
Tabela 5 - Tempos coletados mês de agosto.....	39
Tabela 6 - Tempos coletados mês de setembro .....	40
Tabela 7 – Sequenciamento EDD para o mês de julho.....	41
Tabela 8 – Sequenciamento EDD para o mês de agosto .....	42
Tabela 9 – Sequenciamento EDD para o mês de setembro .....	42
Tabela 10 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de julho .....	43
Tabela 11 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de agosto.....	44
Tabela 12 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de setembro....	44
Tabela 13 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de julho .....	45
Tabela 14 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de agosto.....	46
Tabela 15 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de setembro....	46
Tabela 16 –Resultados das Heurísticas Desenvolvidas.....	47
Tabela 17 – Análises dos resultados do mês de julho .....	48
Tabela 18 – Análises dos resultados do mês de agosto .....	48
Tabela 19 – Análises dos resultados do mês de setembro .....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Critérios de Sequenciamento. ....	19
Quadro 2 – Divisão de Grupos de Atividade. ....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS

EDD	<i>Earliest Due Date</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
LEC	Lote Econômico de Compra
LPT	<i>Largest Processing Time</i>
PCP	Planejamento e Controle da Produção
QPSD	<i>Quadratic Penalties and Sequence-Dependent</i>
RS	<i>Random-start pairwise</i>
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	11
1.1.2 Objetivos Específicos .....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA .....	14
2.2 SEQUENCIAMENTO DE TAREFAS .....	17
2.2.1 Critérios de Sequenciamento de Tarefas .....	19
2.2.2 Técnicas De Sequenciamento.....	20
2.2.2.1 Heurísticas .....	20
2.2.2.2 <i>Shortest Processing Time</i> (SPT) .....	20
2.2.2.3 <i>Longest Processing Time</i> (LPT) .....	20
2.2.2.4 <i>Earliest Due Date</i> (EDD) .....	21
2.3 AMBIENTES PRODUTIVOS .....	21
2.3.1 Máquina Única.....	21
2.3.2 Máquinas Paralelas.....	22
2.3.3 <i>Flow Shop</i> .....	23
2.3.4 <i>Job Shop</i> .....	24
2.4 TEMPOS DE <i>SETUP</i> DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA.....	25
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	27
3.1 OBJETO DE PESQUISA .....	27
3.2 COLETA DE DADOS.....	28
<b>4 DESENVOLVIMENTO</b> .....	29
4.1 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE PRODUTIVO .....	29
4.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	31
4.3 PROCEDIMENTOS .....	31
4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA .....	32
4.4.1 Notação .....	32
4.4.2 Aplicação.....	32
4.4.3 Heurísticas .....	33
4.4.3.1 Regra <i>Earliest Due Date</i> .....	33

4.4.3.2 Heurística Proposta 1 .....	34
4.4.3.3 Heurística Proposta 2 .....	36
4.5 <i>HARDWARE</i> UTILIZADO .....	37
<b>5 RESULTADOS</b> .....	38
5.1 TAREFAS SEQUENCIADAS .....	38
5.1.1 Dados Coletados .....	38
5.1.2 Sequenciamento da Heurística EDD .....	41
5.1.3 Sequenciamento da Heurística Proposta 1 .....	42
5.1.4 Sequenciamento da Heurística Proposta 2 .....	44
5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	46
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	47
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	50
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	52
<b>APÊNDICE I</b> – Algoritmo EDD .....	56
<b>APÊNDICE II</b> – Heurística Proposta 1 .....	58
<b>APÊNDICE III</b> – Heurística Proposta 2 .....	61
<b>APÊNDICE IV</b> – Tabela 4 Tempos coletados mês de julho .....	64

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo influencia diretamente a quantidade de itens a serem produzidos pelas empresas de manufatura. Clientes esperam encontrar os itens procurados nas prateleiras ou que o prazo de encomenda seja o mínimo possível. Os setores gerenciais das empresas precisam encontrar maneiras para atender a demanda crescente sem perder os prazos estipulados. A variação dos fatores, como aumento da inflação, aumento da competitividade entre fornecedores e da concorrência faz com que as empresas tenham que reagir de forma rápida e com eficácia.

O crescimento dos níveis de produção torna indispensável a redução das ineficiências do processo para manter-se competitivo dentro do mercado. Uma empresa pode aplicar melhorias de curto, médio ou longo prazo para solucionar o problema da competitividade. Da mesma forma que cada ação tem um impacto diferente para cada setor dentro da empresa. Os setores operacionais tendem a formular soluções de curto prazo, ou seja, solucionar de forma pontual um problema específico, já os setores táticos aplicam soluções que visam o médio prazo e os setores gerenciais procuram projetar uma mudança de longo prazo.

O plano de produção tem importante impacto na entrega dos produtos. Muitas vezes a sequência de produção é afetada pelo setor de vendas que exige uma prioridade em algum específico, ou por restrições de matéria prima disponível. Um sequenciamento de produção desorganizado pode gerar um acúmulo de produtos em estoque intermediário, ou seja, esperar a liberação da próxima máquina para o processamento. A programação da produção feita de forma indevida acarreta em efeitos negativos para o processo.

O gerenciamento de um processo pode ser projetado através de um modelo. Modelos servem tanto para simular um ambiente real, como transformá-los em variáveis matemáticas para a aplicação em fórmulas. Esses modelos têm a capacidade de gerar respostas e representar uma condição futura do sistema estudado.

A programação de tarefas pode ser analisada e modelada para ser simulada ou transformada em um modelo matemático. Essa modelagem impacta diretamente no resultado obtido. Uma coleta de dados feita de forma equivocada, ou fatores de

grande impacto desconsiderados na modelagem trazem um resultado que pode não retratar a realidade.

O uso de modelagem matemática e heurísticas construtivas aplicadas ao sequenciamento de tarefas contempla inúmeros processos. Para montar o modelo que será utilizado para o estudo é necessário saber todas as etapas e limitações do processo. Da mesma forma é necessário o total entendimento do ambiente produtivo.

Utilizar heurísticas construtivas possibilita alcançar uma resposta relativamente boa em um tempo de processamento muito reduzido. Gerar todas as possibilidades de sequenciamento de tarefas em cada máquina exigem muito tempo de processamento. Por isso, uma alternativa é utilizar heurísticas que de alguma forma reduzem o tempo de resolução.

Uma empresa localizada na região dos Campos Gerais no estado do Paraná possui um gargalo produtivo em seu processo, gerado em grande parte pelo tempo de *setup* entre cada produto produzido. Uma maneira de contornar esta situação é estruturar esta situação por modelagem matemática, e então aplicar um método de que torne esse processo mais eficaz.

Sequenciar tarefas de forma efetiva e com rapidez é uma forma que o setor de planejamento e controle da produção utiliza para adequar a produção com as datas de entrega. Utilizar algoritmos e heurísticas são formas de alcançar respostas boas com altas performances num curto espaço de tempo desde que projetados para isso. Tendo isso como base este trabalho tem como objetivo responder: como reduzir o atraso total de entregas de atividades num ambiente de máquina única com tempos de *setup* dependentes.

## 1.1 OBJETIVOS

Essa seção apresenta os objetivos dessa pesquisa, sendo eles o objetivo geral e os objetivos específicos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor e avaliar novas maneiras, de sequenciar tarefas em um ambiente de máquina única com tempo de *setup* dependente de sequência para reduzir o atraso total dos tempos de entrega.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Compreender as atividades realizadas no ambiente produtivo;
- ii. Identificar, na literatura, métodos de resolução para um sequenciamento de alta performance;
- iii. Construir modelos de sequenciamento para redução do atraso total;
- iv. Estruturar resultados dos modelos construídos;
- v. Propor um projeto de melhoria utilizando o modelo com os melhores resultados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Cientes esperam, quando encomendam algum tipo de produto, que de alguma forma o produto encomendado chegue dentro do prazo estabelecido. Para isso as empresas precisam adequar seus planos de produção de forma que todas as tarefas que compõem a fabricação de seus produtos sejam feitas dentro do prazo determinado. Um sequenciamento de tarefas eficiente garante um aumento da confiabilidade dos prazos de entrega da empresa.

Por muitas vezes as empresas atendem mais pedidos que a capacidade de produção dos maquinários suporta para um determinado período de tempo. Isso implica em uma situação na qual passa a ser um fator importante a ser analisado o tempo em que as máquinas ficam paradas para preparação para o próximo produto a ser produzido. O sequenciamento eficiente colabora com o aumento da capacidade produtiva.

Considerando tais fatores, é essencial buscar maneiras de minimizar os atrasos dos pedidos aos clientes levando em consideração os tempos ociosos gastos com a preparação das máquinas para os produtos a serem produzidos. Com um sequenciamento de tarefas de alto desempenho é possível reduzir os custos de produção, o tempo de *setup*, e a perda de clientes.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos. No Capítulo 1 são introduzidos o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa. O Capítulo 2 revisa a bibliográfica sobre modelagem matemática, sequenciamento de tarefas, ambientes produtivos e o problema de máquina única com tempos de *setup*

dependentes da sequência. A metodologia é apresentada no Capítulo 3, definindo a finalidade, a abordagem, o objetivo e a classificação da pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os métodos aplicados neste trabalho. O Capítulo 5 apresenta os resultados e as discussões. O fechamento deste trabalho é feito no Capítulo 6 com as conclusões do mesmo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo revisa os princípios de modelagem matemática, os métodos utilizados para o sequenciamento de tarefas em ambientes produtivos e também as definições sobre regras de sequenciamento e sobre os ambientes produtivos.

### 2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os objetivos de se construir modelos matemáticos são diversos pois os mesmos são aplicáveis de inúmeras situações. Para Askin e Standridge (1993, p. 21) “modelos são analíticos e experimentais”. Um modelo analítico é a abstração matemática de um acontecimento ou uma situação real em equações e variáveis. Simulação por sua vez é um modelo experimental que tem a tendência de imitar de forma idêntica o evento ocorrido ou simular uma situação futura (ASKIN e STANDRIDGE, 1993; FREITAS FILHO, 2001).

Askin e Standridge (1993) listam os propósitos da construção de modelos como:

- i. Otimização;
- ii. Desempenho;
- iii. Controle;
- iv. Compreensão; e
- v. Justificativa

Os modelos que são construídos com o objetivo de otimização são executados de forma a procurar os melhores valores para cada variável de decisão. Em muitas situações reais, as variáveis de decisão têm relações não lineares ou precisam ser consideradas como variáveis inteiras implicando em certa dificuldade de resolução do modelo. Estes casos são considerados de otimização uma vez que é buscado um resultado ótimo (ASKIN e STANDRIDGE, 1993).

O segundo objetivo da construção de modelos matemáticos é prever a performance, ou seja, prever o desempenho de cada variável do objeto analisado. Este tipo de modelo tem a capacidade de responder uma série de perguntas como: o que aconteceria se a demanda aumentasse, ou o que aconteceria se houvesse uma mudança nos preços? Este tipo de modelo matemático mede o impacto que cada alteração nas variáveis de decisão tem no sistema modelado (ASKIN e STANDRIDGE, 1993; FREITAS FILHO, 2001).

Uma aplicação prática dos modelos de controle é proposta por Askin e Standridge (1993) como uma escolha de políticas de sequenciamento em que um setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) deve aplicar para sequenciar suas tarefas. O setor tem duas opções: (1) utilizar o método *Shortest Processing Time* (SPT); ou (2) utilizar o método *Earliest Due Date* (EDD) para sequenciar as tarefas. Modelos de controle então, têm como objetivo selecionar as melhores medidas as serem aplicadas dentro das opções avaliadas e propostas.

Modelos de compreensão fornecem ao modelador um melhor entendimento da situação retratada, bem como, quais são os reais gargalos produtivos e as reações que acontecem dentro do sistema. Esses modelos são utilizados como ferramentas de diagnóstico. Já os modelos de justificativa são modelos em que podem ter seus resultados apresentados de forma gráfica da simulação de um horizonte de tempo (ASKIN e STANDRIDGE, 1993).

Os modelos matemáticos de forma geral se utilizam de um conjunto de equações matemáticas ou de ligações lógicas para descrever um sistema real. A modelagem matemática pode ser considerada um método analítico, uma vez que, após a resolução do modelo é gerada a forma em que as variáveis de decisão deverão ser aplicadas (ASKIN e STANDRIDGE, 1993).

A criação de modelos é essencial para que se consiga sintetizar uma situação real em algo que de alguma forma represente as variáveis do problema analisado. Segundo Pizzolato e Gandolpho (2009, p. 2-3), “Modelos Simbólicos: usam letras, números e símbolos para representar variáveis e suas relações funcionais”.

Hillier e Lieberman (2006) descrevem as fases que compõem um estudo de Pesquisa Operacional como:

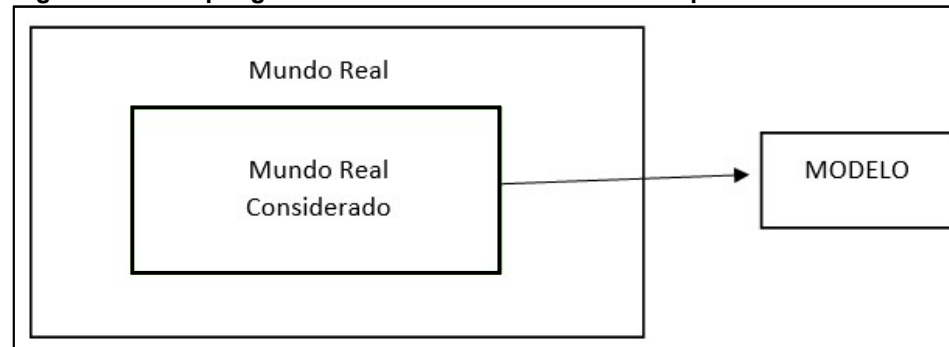
- i. Definição do problema e coleta de dados;
- ii. Formulação de um modelo matemático que represente o problema;
- iii. Desenvolvimento de um procedimento computacional que gere soluções para o problema;
- iv. Testar o modelo; e
- v. Implementar.



Em certos problemas o grau de dificuldade envolvido é tão grande que há necessidade de simplificar a realidade estudada, deve-se manter as características originais do problema (PIZZOLATO; GANDOLPHO, 2009).

Uma maneira de reduzir a dificuldade na formulação de um modelo matemático é modelar apenas uma porção de todo ambiente estudado. Sendo assim, o problema se torna mais específico e reduzido. A Figura 1 mostra uma maneira de simplificar o objeto estudado na construção de um modelo matemático.

**Figura 1 – Exemplo gráfico de Gantt em ambiente de máquina única**



Fonte: Autoria própria

Na Figura 1 o Mundo Real é todo o ambiente onde o problema estudado se encontra. Uma característica do Mundo Real seria a alta complexidade das variáveis e a elevada dificuldade de se elaborar um modelo matemático que o representasse.

O Mundo Real Considerado seria uma porção menor que faça parte do Mundo Real. Essa porção englobaria as principais variáveis e restrições, porém com uma dificuldade menor de ser modelar matematicamente este ambiente. Uma característica do Mundo Real Considerado é que as regras que se aplicam no Mundo Real também se aplicam a esta porção menor.

Pizzolato e Gandolpho (2009) descrevem os três pontos que devem ser realizados para se iniciar uma modelagem matemática:

- i. Avaliar a natureza do problema;
- ii. Levantar dados; e
- iii. Identificar as restrições e as limitações.

Taha (2008) lista os três elementos principais de um problema como:

- i. Descrição das alternativas de decisões;
- ii. Determinar o objetivo do estudo; e

iii. Identificar as limitações.

A construção do modelo tem como objetivo sintetizar o problema em um modelo matemático que pode ser ajustado a partir de um modelo já existente.

A validação da solução é definida por Pizzolato e Gandolpho (2009, p. 4) como “estimar se a solução do modelo corresponde, de fato, a uma solução consistente”. Um modelo bem formulado e testado tende a trazer respostas que se aproximam da realidade em questão. Para eventos práticos, gerentes buscam um resultado suficientemente bom para os problemas levantados. Isso pode ser definido como *satisficing*, que é a combinação das palavras em inglês *satisfactory* (satisfatório) e *optimizing* (otimização), geração de resultados que atendam às expectativas dos aplicadores (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

A implementação prática é a etapa final da modelagem de problemas. Esta etapa possibilita a implementação do modelo no sistema sobre o qual ocorreu o estudo. É importante que aconteça a validação do modelo para que haja a possibilidade de reutilizá-lo no futuro em condições similares (PIZZOLATO; GANDOLPHO, 2009).

## 2.2 SEQUENCIAMENTO DE TAREFAS

Indústrias de manufatura ou empresas de serviços utilizam de forma regular o processo de sequenciamento de atividades. Este processo de decisão implica em alocar recursos com o objetivo de otimizar um ou mais objetivos para as tarefas sequenciadas. Os recursos podem variar desde a quantidade de energia elétrica que uma máquina pode utilizar num processo, quanto o tempo disponível para o processamento de uma atividade. As tarefas podem ser sequenciadas com o objetivo de retornar de maneira otimizada a utilização dos recursos disponíveis (PINEDO, 2005).

O sequenciamento de tarefas é um processo que define a ordem em que as atividades serão feitas em cada máquina. Um dos desafios que o setor do PCP enfrenta é entregar os produtos finais dentro dos prazos que os clientes estabelecem. Em adição a isso, produtos finalizados muito antes do prazo de entrega geram um estoque intermediário desnecessário que podem gerar custos adicionais ao processo, por isso tal adiantamento deve ser evitado. O sequenciamento é ainda um processo que adiciona um tempo de início e término às

atividades a serem processadas (ASKIN e STANDRIDGE, 1993; CONSENTINO e ERDMANN, 1999).

Segundo Pinedo (2005) em um ambiente empresarial é importante que o setor que sequencia as atividades interaja com os demais setores. Segundo Askin e Standridge (1993) há uma série de critérios que são levados em conta quando se programa uma sequência de tarefas a serem processadas. Esses critérios são o momento de término, *flow time*, atraso e entrega antecipada, entre outros.

As tarefas programadas e assim sequenciadas podem ser gerenciadas através de um gráfico de Gantt. Este tipo de gráfico permite o monitoramento das atividades planejadas.

Fitzsimmons e Fitzsimmons (2014) descrevem como o objetivo de um gráfico de Gantt, determinar os momentos em que as tarefas se iniciam e o momento de término destas tarefas. Este tipo de gráfico é útil para acompanhar de forma visual o avanço de cada tarefa em uma linha de tempo. E monitorar o avanço do projeto em relação ao planejado.

A Tabela 1 traz os valores de tempo de processamento, a posição na sequência de processamento da tarefa, a data em que essa tarefa deve ser entregue e o atraso da tarefa.

**Tabela 1 - Tempos de processamento**

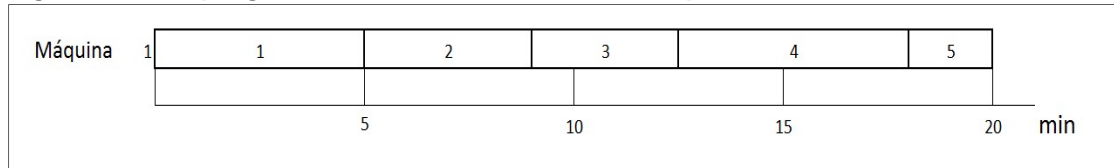
Tarefa	Tempo de processamento (min)	Posição na sequência	Data de Entrega (min)
1	5	1	6
2	4	2	8
3	3,5	3	12
4	5,5	4	19
5	2	5	19

**Fonte: Autoria própria**

O tempo de processamento é a quantidade de tempo em que a tarefa leva para ser processada. A posição no sequenciamento é a ordem em que as tarefas serão processadas. Já a data de entrega indica em qual momento que a tarefa deve ser processada.

A Figura 2 apresenta um gráfico de Gantt utilizando os dados fornecidos pela Tabela 1.

**Figura 2 – Exemplo gráfico de Gantt em ambiente de máquina única**



Fonte: Autoria própria

O gráfico apresentado pela Figura 2 indica de forma visual os valores de início e fim de cada tarefa, além de mostrar a ordem e o momento planejado de cada atividade processada.

### 2.2.1 Critérios de Sequenciamento de Tarefas

Um dos objetivos da programação da produção é definir as prioridades e desenvolver planos que irão nortear a produção. Dentro de empresas de manufatura ou serviços as atividades são sequenciadas com algum objetivo específico, seja ele, minimização de tarefas atrasadas, redução do atraso do total, entre outros (CONCEIÇÃO et al., 2009).

Fuchigami e Rangel (2015) listam os objetivos mais relevantes para o sequenciamento de tarefas como: *makespan*, *flow time*, atraso total. Outro critério listado por Askin e Standridge (1993) é o número de tarefas atrasadas.

O Quadro 1 apresenta as definições de cada critério de sequenciamento de tarefas.

**Quadro 1 - Critérios de Sequenciamento**

Critério	Definição
<i>Makespan</i>	Tempo de finalização da última tarefa processada
<i>Flow Time</i>	Tempo total de processamento das tarefas
Atraso Total	Soma dos tempos de atraso de cada tarefa
Número de Tarefas Atrasadas	Soma de todas as tarefas entregues atrasadas

Fonte: Autoria própria

Os critérios apresentados no Quadro 1 são demonstrados de forma prática pela Tabela 2 utilizando os dados da Tabela 1.

**Tabela 2 – Resultado dos Critérios de Sequenciamento**

<b>Critério</b>	<b>Resultado</b>
<i>Makespan</i>	20
<i>Flow Time</i>	64,5
Atraso Total	2,5
Número de Tarefas Atrasadas	3

**Fonte: Autoria própria**

## 2.2.2 Técnicas De Sequenciamento

Essa subseção revisa os conceitos das heurísticas, algoritmos e regras encontrados na literatura para o sequenciamento de tarefas.

### 2.2.2.1 Heurísticas

Heurísticas são métodos que consistem em definir procedimentos, estratégias e métodos de forma a retornar um resultado bom com um tempo de processamento razoável. Há muitos fatores para a utilização de heurísticas, como por exemplo: a falta de métodos exatos; a falta de tempo disponível para resolução de um problema via método exato; a dificuldade de aplicar algoritmos; e as bases de dados não muito confiáveis. Heurísticas também servem como etapas de outros algoritmos (FREITAS FILHO, 2001; CORDENONSI, 2008).

#### 2.2.2.2 *Shortest Processing Time* (SPT)

Segundo Baker e Trietsch (2013) e Pinedo (2005) SPT é uma regra de prioridade que ordena as tarefas de forma crescente levando em consideração seus tempos de processamento. Isso significa que atividades que possuem tempo de processamento menores serão as primeiras a serem processadas.

Segundo Baker e Trietsch (2013) a regra SPT é recomendada quando o critério do sequenciamento é a redução do *flow time*.

#### 2.2.2.3 *Longest Processing Time* (LPT)

Pinedo (2005) sugere o uso da regra *Longest Processing Time* (LPT) para redução do *makespan*. Esta regra designa as atividades com o maior tempo de processamento para serem produzidas por primeiro em cada máquina.

#### 2.2.2.4 Earliest Due Date (EDD)

A regra EDD pode ser utilizada para a minimização do atraso total de tarefas em uma sequência. Isso significa entregar as tarefas de forma que a soma dos atrasos seja minimizada. Esta regra prioriza o processamento de tarefas que tenham a menor data de entrega, ou seja, as tarefas que tem a menor data de entrega são processadas primeiramente (PINEDO, 2005).

### 2.3 AMBIENTES PRODUTIVOS

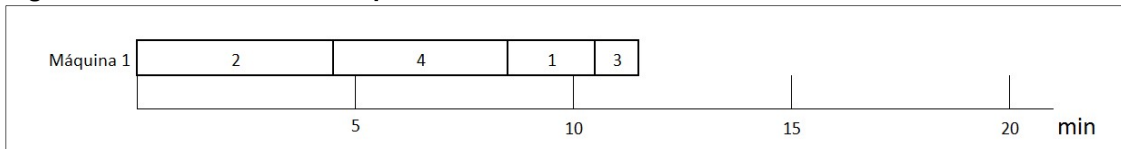
Esta seção revisa as características dos ambientes produtivos de máquina única, máquinas paralelas, *flow shop* e *job shop*.

#### 2.3.1 Máquina Única

Comparado aos demais cenários, o ambiente produtivo definido como máquina única é considerado por Pinedo (2005) um ambiente mais simples. No entanto, uma das características que ambientes produtivos de máquina única apresentam é a possibilidade formular modelos, sendo eles matemáticos ou de simulação, que servem de base para muitos outros modelos de produção mais complicados, de resolução mais difícil. Isso é possível porque problemas mais sofisticados são frequentemente decompostos em problemas menores.

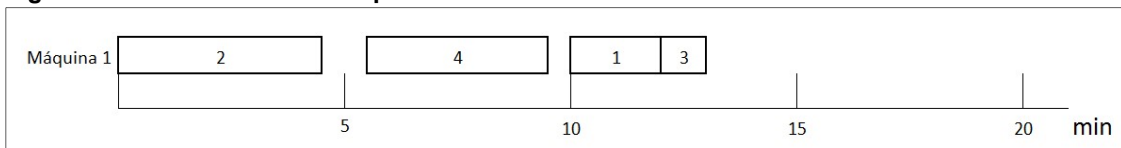
Os problemas de programação em ambientes de máquina única são definidos como “uma única máquina disponível para o processamento das tarefas” (FUCHIGAMI et al., 2015, p. 87). De outra forma, Askin e Standridge (1993) sugerem que máquinas únicas podem ser representadas tanto como um ambiente que possua uma única máquina disponível para o processamento, quanto como um ambiente com várias máquinas que seja analisado como um todo, ou ainda, como um ambiente com mais de uma máquina disponível, porém possuindo uma única máquina, que geralmente é o gargalo do processo, que será analisada para a formulação do problema de programação.

Segundo Choi et al. (2011) ambientes de produção com máquina única não podem processar mais de uma tarefa por vez. Assim, o momento de início de qualquer tarefa é maior ou igual ao momento de término da tarefa que a precede. Esta relação é vista na Figura 3.

**Figura 3 - Gráfico de Gantt máquina única 1**

Fonte: Autoria própria

A Figura 3 é um gráfico de Gantt para uma sequência de atividades processadas em uma única máquina, cada tarefa inicia-se no momento de término da tarefa antecessora. A Figura 4 mostra uma situação diferente da apresentada pela Figura 3.

**Figura 4 - Gráfico de Gantt máquina única 2**

Fonte: Autoria própria

A Figura 4 mostra as mesmas atividades que a Figura 3, porém ilustrando um sequenciamento onde houve um período ocioso da máquina entre as atividades 2 e 4 e outro momento ocioso entre as atividades 4 e 1. Isso mostra que pode haver uma folga entre atividades, mas nunca uma sobreposição das atividades.

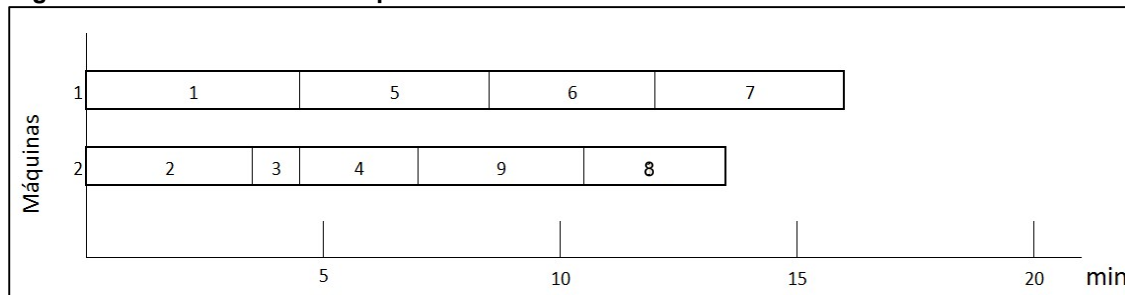
### 2.3.2 Máquinas Paralelas

Hordones et al. (2016), Neto et al. (2013) e Xi (2013) consideram o ambiente de máquinas paralelas como um ambiente em que exista duas ou mais máquinas, muitas vezes idênticas, disponíveis para o processamento de atividades. As atividades as serem processadas podem ou não serem liberadas todas no mesmo instante de tempo.

Uma das premissas básicas deste tipo de ambiente é que cada tarefa seja processada apenas uma vez, e também, como em um ambiente de máquina única, o tempo de início de uma tarefa deve ser maior ou igual ao instante de tempo de término da tarefa processada anteriormente.

Na Figura 5 será apresentado um gráfico de Gantt para um ambiente de máquinas paralelas.

**Figura 5 - Gráfico de Gantt Máquinas Paralelas**



Fonte: Autoria própria

A Figura 5 mostra um ambiente de máquinas paralelas onde existem 9 atividades para processamento. Cada tarefa foi processada apenas uma vez.

### 2.3.3 Flow Shop

*Flow shop* é um ambiente produtivo em que todas as tarefas a serem processadas possuem a mesma sequência de processamento nas máquinas (HORDONES et al. 2016).

Segundo Pinedo (2005), em grande parte das indústrias de montagem e manufatura as tarefas processadas devem seguir sempre a mesma ordem. Isso implica que todas as tarefas devem seguir a mesma rota de processamento. Esse tipo de ambiente é chamado de *flow shop*.

Um dos problemas encontrados nesse tipo de ambiente são os estoques intermediários, peças ou lotes que aguardam a liberação da próxima máquina para seu processamento. Nagano et al. (2015) apresentam heurísticas construtivas para o sequenciamento das tarefas de forma que não haja espera entre o término de uma tarefa e o início da tarefa da seguinte. Isso implica diretamente na redução do estoque intermediário dentro do processo.

O sequenciamento de tarefas num ambiente *flow shop* tem aplicação de diversos tipos de restrições e a utilização de diferentes heurísticas construtivas para sua resolução. Neto et al. (2013) incluem o tempo de *setup* dependente da sequência na criação de modelos para sequenciamento de lotes. Hordones et al. (2016) propõem uma heurística construtiva que utiliza as regras EDD e *Minimum Slack Time* (MST) para redução do número de tarefas atrasadas.



### 2.3.4 Job Shop

Os roteiros das atividades num ambiente *job shop* variam de tarefa para tarefa. Geralmente esse tipo ambiente produz uma alta variedade de produtos em pequena escala.

Diferente dos ambientes *flow shop*, que apresentam rotas fixas e iguais para cada tarefa processada, o ambiente *job shop* considera que cada tarefa tem sua própria sequência dentro do conjunto de máquinas disponíveis. A utilização das máquinas também não é a mesma para cada tarefa, uma vez que uma máquina pode processar mais de uma vez a mesma tarefa (HORDONES, 2016; PINEDO, 2005).

Um exemplo de *job shop* é apresentado utilizando um problema de *job shop* proposto por Pinedo (2005) de forma simplificada para um ambiente com duas máquinas e 5 tarefas.

A Tabela 3 mostra os tempos de processamento em cada máquina para cada tarefa.

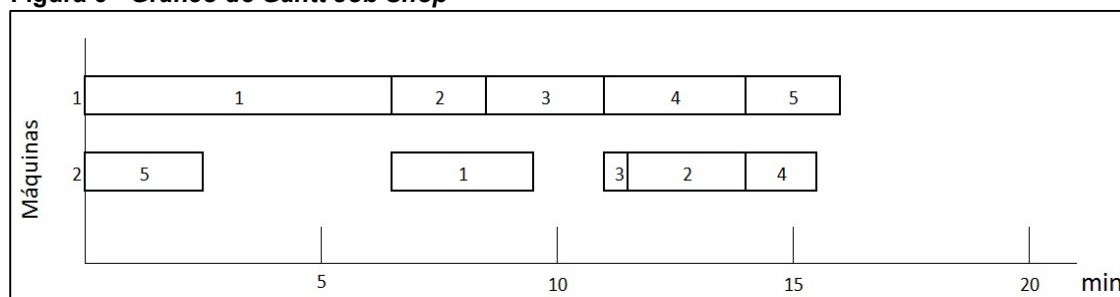
**Tabela 3 - Tempos de máquina**

Tarefas	Máquina 1 (min)	Máquina 2 (min)
1	2,5	2,5
2	1,5	1,5
3	1	1,5
4	1,5	2
5	3,5	2,5

Fonte: Autoria própria

A Figura 6 mostra um gráfico de Gantt do sequenciamento das atividades listadas da Tabela 3.

**Figura 6 - Gráfico de Gantt Job Shop**



Fonte: Autoria própria

Neste problema as tarefas 1, 2, 3 e 4 deveriam ser processadas primeiramente na máquina 1 e então na máquina 2. Ao contrário, a tarefa 5 é processada primeiro na máquina 2 e, em seguida, na máquina 1.

#### 2.4 TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA

A programação da produção envolve variáveis como tempo de processamento, datas de entrega, tempos de *setup*, entre outros. Em indústrias alimentícias, por exemplo, são produzidos diversos tipos de produtos. Entre a produção de cada produto é necessário fazer as atividades que compõe o *setup*.

Quando uma tarefa termina de ser processada em uma máquina é necessário limpar a máquina para que o próximo produto a ser processado não seja contaminado pelos insumos da tarefa anterior. Além da limpeza, outras atividades são realizadas na preparação do maquinário por exemplo, ajustes nos moldes e parâmetros de máquina.

Em alguns casos, os insumos utilizados nas tarefas são semelhantes e não há necessidade de incluir as atividades de limpeza de máquina, ou trocas de moldes. Isso significa que dependendo da sequência das tarefas a serem processadas em uma máquina o tempo de *setup* entre as tarefas pode ser diferente.

O problema da programação de tarefas em um ambiente de máquina única com os tempos de *setup* variando de acordo com a sequência programada pode ser descrito conforme segue. Existe um número finito de tarefas a serem processadas por uma única máquina. O tempo de *setup* da máquina é variável para cada tarefa e depende da tarefa que a antecede. A máquina disponível respeita a restrição de processar apenas uma tarefa por vez, ou seja, não aconteça sobreposição de tarefas (MORAIS, 2010; PINEDO, 2005).

Segundo Pinedo (2005) o problema de máquina única com tempos de *setup* dependentes é equivalente ao problema do caixeiro viajante. O problema do caixeiro viajante é um problema de otimização onde um vendedor deve percorrer todas as cidades consideradas visitando cada uma delas uma única vez de forma a reduzir o custo total da viagem. No entanto, Kodaganallur et al. (2014) comparam o problema de máquina única com tempos de *setup* dependentes ao problema do caixeiro viajante assimétrico. Silva e Oliveira (2006) definem o problema do caixeiro viajante assimétrico de forma muito similar ao do caixeiro viajante, porém com a diferença que o custo entre ir de uma cidade para outra pode ser diferente do custo da volta.

A tendência dos problemas de sequenciamento segundo Yin et al. (2011), é adicionar tempos de *setup* entre tarefas e tempos de manutenção como parte do problema.

O sequenciamento em máquina única onde há  $n$  tarefas, possui  $n!$  sequencias possíveis (KODAGANALLUR et al. 2014). Segundo Pinedo (2005) a minimização do atraso total em máquina com *setup* dependente da sequência  $(1|s_{ij}|\sum T)_j$  é classificada como NP-difícil. A inclusão de tarefas liberadas em algum intervalo de tempo diferente do momento inicial torna o modelo ainda mais difícil.

Para Pinedo (2005) a solução ótima para o problema de sequenciamento de tarefas em máquina única com tempos de *setup* dependentes da sequência utilizando os métodos *branch-and-bound* e programação dinâmica não é alcançada em tempo polinomial.

Tan et al. (2000) sugerem o uso de quatro métodos para o sequenciamento. Apesar de Pinedo (2005) destacar que a utilização do algoritmo *branch-and-bound* não alcança uma solução ótima em tempo polinomial, Tan et al. (2000) aplicam este método com uma limitação de 5 milhões de iterações. Os demais métodos aplicados por Tan et al. (2000) foram Algoritmo Genético, *Random-start pairwise (RS)* e *Simulated annealing*. A efetividade do método *branch-and-bound* é constatada até 35 tarefas, após isso a limitação de 5 milhões de nós é excedida.

Segundo Sen e Gupta (1984) a regra EDD é frequentemente utilizada para minimizar o atraso total. Kodaganallur et al. (2014) utilizam o algoritmo *Quadratic Penalties and Sequence-Dependent (QPSD)* que penaliza tarefas atrasadas e considera também tempos de *setup* dependente da sequência.

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa foi feito a partir de revisões bibliográficas baseada em livros e artigos.

A finalidade da pesquisa é de caráter aplicado. Uma pesquisa aplicada, segundo Gil (2008, p.27), “tem como característica fundamental o interesse na aplicação, utilização e consequências práticas dos conhecimentos”. Esta pesquisa busca gerar uma aplicação prática de modelos matemáticos desenvolvidos para o sequenciamento de tarefas num ambiente produtivo de máquina única com *setup* dependente da sequência.

A abordagem da pesquisa se caracteriza como quantitativa, uma vez que os dados coletados serão confrontados com dados gerados através dos modelos propostos. Bertrand e Fransoo (2002) apontam que pesquisas com abordagens quantitativas são baseadas em modelos que tem a capacidade de explicar o comportamento de processos reais e representar os fatores de tomada de decisão de problemas reais. Além disso, reforçam a relação entre as variáveis descritas e os impactos que elas geram em todo o modelo.

O objetivo da pesquisa é propor melhorias no sequenciamento de tarefas num ambiente de produtivo para a redução do atraso total de entrega das tarefas. Isso implica que o objetivo desta pesquisa é de caráter exploratório. “Pesquisas exploratórias são desenvolvidas com o objetivo de proporcionar visão geral, do tipo aproximativo, acerca de determinado fato” (GIL, 2008, p.27). Foi feito um levantamento de dados e bibliografia acerca do assunto tratado pela pesquisa e definido os métodos mais utilizados nas bibliografias.

Segundo Gil (2008) a classificação das pesquisas em exploratórias, descritivas e explicativas é muito útil para o estabelecimento de seu marco teórico, ou seja, para possibilitar uma aproximação conceitual. Os procedimentos utilizados nesta pesquisa são baseados em pesquisa bibliográfica. A pesquisa teve partida baseando-se em referências de impacto já publicadas para o embasamento técnico para o desenvolvimento do tema.

#### 3.1 OBJETO DE PESQUISA

Este trabalho foi aplicado em uma empresa localizada no Paraná, na região dos Campos Gerais. Esta empresa possui um ambiente produtivo que pode ser considerado como *flow shop*.

De todas as máquinas, a primeira máquina é onde há o maior número de restrições produtivas. Além disso, o ritmo de produção dessa máquina é o limita a capacidade produtiva da empresa. Para isso, foi avaliado esta única máquina, o que torna a classificação do ambiente produtivo como máquina única. Em adição, os tempos de *setup* são diferentes de acordo com as sequências das atividades. Por fim, o objetivo da pesquisa é a otimização do sequenciamento de tarefas num ambiente de máquina única com tempo de *setup* dependente.

A coleta de dados foi feita através do histórico de produção do mês de julho, agosto e setembro do ano de 2016. Estes dados contêm informações de quantidade de produtos produzidos, tipo de produto, tempo de preparação de máquinas e sequência de produção. Estes dados serão tratados de maneira que possam ser utilizados de forma coerente nos modelos propostos.

### 3.2 COLETA DE DADOS

Segundo Gil (2008) os procedimentos necessários para a coleta de dados são:

- i. Buscar apoio das lideranças locais;
- ii. Fornecer aos interessados as informações obtidas; e
- iii. Preservar a identidade dos respondentes.

Seguindo os procedimentos acima listados foi possível coletar os dados de produção de forma segura e de maneira confiável. Foi importante buscar o apoio da liderança uma vez que os dados utilizados por este trabalho de alguma forma mostram os tempos de produção e prazos de entrega dos produtos processados. Outro procedimento de elevada importância é preservar a identidade dos respondentes. Para este caso foi preservado o nome da empresa, ramo de atuação e o produto final fabricado.

Nesta pesquisa os dados obtidos foram coletados através do histórico de dados do software que controla o início e término de processamento de cada produto. A tabulação dos dados coletados teve os nomes das atividades substituídos por códigos.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta a descrição do ambiente produtivo estudado, a identificação e a modelagem do problema, além da estratégia de resolução.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE PRODUTIVO

O ambiente produtivo estudado consiste em um sistema onde há uma única máquina responsável por processar  $n$  tarefas previamente disponíveis. A máquina utilizada nesse processo produtivo é uma calandra que tem como principal função atribuir o formato laminado a polímeros. Outro processo que este tipo de máquina faz é a impregnação de borracha em tecidos. Nesta máquina são processados três grupos de produtos. São eles: mantas de borracha; tecidos impregnados com borracha; e aplicação de coberturas de borracha a materiais. Para cada grupo há uma subdivisão de tarefas que podem ser realizadas para os sete tipos de produtos processados pela calandra.

O Quadro 2 apresenta a divisão dos grupos entre cada tarefa processada no ambiente produtivo estudado.

**Quadro 2 – Divisão de Grupos de Atividade**

Tarefa	Grupo
Manta tipo 1	1
Manta tipo 2	2
Manta tipo 3	3
Manta tipo 4	4
Impregnação de Tecido tipo 1	5
Impregnação de Tecido tipo 2	6
Cobertura de material	7

Fonte: Autoria própria

A máquina pode realizar no máximo um processo por vez e uma vez iniciado um processo de uma tarefa não é permitida a interrupção. No ambiente estudado, as tarefas a serem processadas em cada mês têm seu estoque de matéria-prima disponível desde o primeiro dia, o que permite o adiantamento de tarefas que

tenham entregas programadas para o fim do mês. Isso indica que a disponibilidade para processamento de cada tarefa será desde o primeiro dia de cada mês. Outra característica do processo produtivo é que cada tarefa é processada apenas uma vez pela calandra. Reparos e retrabalhos são feitos fora da máquina.

Os principais parâmetros de processo da máquina são:

- i. Velocidade de máquina;
- ii. Largura de corte; e
- iii. Espessura do laminado.

Com esses parâmetros configurados na máquina é possível atingir o resultado esperado de cada tarefa. Apesar das tarefas estarem agrupadas, cada tarefa possui suas características próprias, são elas: largura, espessura e comprimento.

O tempo de preparo entre cada par de tarefas varia de acordo com a sequência de produção. Isso significa que o tempo de *setup* entre materiais do mesmo grupo é diferente que o tempo de *setup* entre materiais de grupos diferentes.

Os *setups* contemplam atividades como troca de composto para fabricação de laminados, puxamento de tecido para impregnação de borracha e limpeza de maquinário depois do uso de materiais contaminantes.

Portanto, o processo está sujeito as seguintes restrições:

- i. Cada tarefa pode ser processada apenas uma vez;
- ii. As tarefas que serão processadas são definidas no início de cada mês;
- iii. Todas as tarefas estarão disponíveis para processamento no momento inicial de cada mês;
- iv. As matérias-primas só podem ser consumidas pelas tarefas previamente definidas para o mês;
- v. Apenas uma tarefa é processada por vez na máquina;
- vi. A tarefa que estiver em processamento não pode ser interrompida para troca de sequência;
- vii. Assume-se que não há tempo de preparação antes do processamento da primeira atividade, ou seja, o tempo de *setup* antes da primeira tarefa será zero; e

- viii. Os tempos de *setup* entre duas tarefas consecutivas são dependentes da sequência.

Com essas informações é possível definir este ambiente produtivo como um ambiente de máquina única com tempos de *setup* dependentes da sequência de produção.

#### 4.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Prazos de entrega reduzidos em um meio industrial exige que os programadores de produção tenham sempre as melhores formas de resolver os problemas de sequenciamento e programação da produção para entregar os produtos dentro dos prazos acordados. Programar o sequenciamento de tarefas de forma eficiente reduzindo tempos de máquina parada e otimizando as datas de entrega é essencial para a manutenção da capacidade de satisfazer as necessidades dos clientes.

Durante o estudo realizado foi identificada a falta de um método padrão para a realização da sequência de produção semanal e mensal. Isso dificulta o cumprimento dos prazos de entrega da produção. Isso também inviabiliza respostas rápidas se houver mudanças nos prazos de entrega de algumas tarefas.

Assim sendo, o problema identificado foi encontrar uma forma de sequenciar tarefas de modo que este sequenciamento priorize as datas de entregas das tarefas dentro do prazo. É importante que o sequenciamento seja feito em um curto espaço de tempo.

#### 4.3 PROCEDIMENTOS

Os dados relacionados aos de tempos de processamento, prazos de entregas e *setups* coletados tiveram que ser tratados de forma que pudessem ser utilizados na formulação da resolução do problema.

Todos os valores de tempo tiveram a unidade de medida convertida para minutos em valores inteiros. Os prazos de entregas originalmente foram coletados na unidade de tempo de dias, e foram transformados para a unidade de tempo de minutos.



## 4.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 4.4.1 Notação

Para utilização de métodos computacionais para resolução de problemas e modelagem matemática primeiro é necessário, de alguma forma, representar o ambiente real em variáveis e os parâmetros numéricos. A seguir os parâmetros utilizados para construção da modelagem matemática são explicados.

Primeiro os valores que são parâmetros como os prazos de entrega, tempos de processamento e *setup* de cada tarefa são definidos.

$p_i$ : tempo de processamento da tarefa  $i$ ;

$d_i$ : data de entrega da tarefa  $i$ ;

$s_{ij}$ : tempo de *setup* entre a tarefa  $i$  e  $j$ ; e

$n$ : número de tarefas disponíveis para processamento.

As variáveis são definidas da seguinte maneira.

$Pseq_{i,j}$ : posição da tarefa  $j$  na sequência  $i$ ;

$Flag_i$ : indicador de processamento da tarefa  $i$  na sequência;

$C_{ik}$ : momento de entrega da  $k$ -ésima tarefa na sequência  $i$ ; e

$T_i$ : atraso da tarefa  $i$ ;

Estas notações fazem com que o ambiente real possa ser modelado matematicamente.

### 4.4.2 Aplicação

A estratégia utilizada para construir um algoritmo que retornasse um valor de atraso total minimizado foi a utilização de heurística. Essa heurística tem base nas regras e princípios já definidos no Capítulo 2. Por existir tempos de *setup*, a construção da heurística também levou em consideração esses tempos para o sequenciamento de tarefas e o cálculo do atraso total.

Para fins de comparação foi desenvolvido um algoritmo que apenas aplica a regra EDD, adaptada para problemas de *setups* dependentes da sequência, para retornar o valor do atraso máximo. As heurísticas desenvolvidas são explicadas a seguir.

### 4.4.3 Heurísticas

As heurísticas a seguir apresentadas aplicam regras para solucionar o problema de minimização do atraso máximo de uma sequência de tarefas com prazos de entrega previamente definidos.

#### 4.4.3.1 Regra *Earliest Due Date*

A regra EDD prioriza o atendimento de tarefas que tenham as menores datas de entrega como as primeiras a serem processadas. Portanto, as tarefas são ordenadas da menor data para a maior data de entrega em uma sequência de processamento.

A regra EDD, aplicada ao problema de minimização do atraso total em máquina única com tempos de *setup* dependentes da sequência, é demonstrada no pseudocódigo a seguir:

---

#### Heurística – EDD

Variáveis

$d(), p(), s(), n, Pseq(), T(), i$

#### INÍCIO

leia  $(d_i, p_i, s_{ij}, n)$

ordene as tarefas de acordo com o  $(d_i)$  em ordem crescente

**para**  $i = 1$  **até**  $n$  **faça**

$Pseq_i \leftarrow$  tarefa ordenada da posição  $i$

**fim para**  $i$

**para**  $i = 1$  **até**  $n$  **faça**

**se**  $i = 1$  **então**

$C_i = p_{Pseq_i}$

**se**  $C_i - d_{Pseq_i} > 0$  **então**

$T_i = C_i - d_{Pseq_i}$

**senão**  $T_i = 0$

Fim se

**senão**  $C_i = C_{i-1} + s_{Pseq_{i-1} Pseq_i} + p_{Pseq_i}$

**se**  $C_i - d_{Pseq_i} > 0$

$T_i = C_i - d_{Pseq_i}$

**senão**  $T_i = 0$

**fim para**  $i$

Retorna  $Pseq_i$  e  $\sum_{i=1}^n T_i$

**FIM**

---

O Apêndice I contém esse mesmo algoritmo escrito em linguagem computacional C.

#### 4.4.3.2 Heurística Proposta 1

A premissa inicial dessa heurística é gerar  $n$  sequências e então compará-las, identificando a melhor, ou seja, a sequência que tenha o menor atraso. Os passos a seguir explicam essa heurística:

- i. Identificar quantas tarefas devem ser sequenciadas;
- ii. Para cada tarefa, criar uma sequência que inicie com tal tarefa;
- iii. Calcular o atraso total de cada sequência, mesmo que as sequências ainda estejam incompletas;
- iv. Incluir na próxima posição de cada sequência a tarefa ainda não processada cuja soma do tempo de *setup*, considerando a atividade anterior, com seu tempo de processamento e com o tempo total de processamento da sequência existente tenha o menor atraso; e
- v. Voltar ao passo III até que não haja mais tarefas para serem alocadas em qualquer sequência.

Como a Heurística Proposta 1 apresentada nessa subseção repete alguns passos, esses passos foram adaptados em funções para a simplificação do pseudocódigo.

Os pseudocódigos a seguir descrevem o funcionamento do momento de entrega de uma tarefa e o cálculo do cálculo do atraso de uma tarefa.

O pseudocódigo Momento de Entrega apresenta a função que calcula o momento de término de uma tarefa na sequência.

---

#### **Pseudocódigo: Momento\_de\_Entrega**

Variáveis

$Pseq(), p(), s(), C(), i,$

**INÍCIO**

**se**  $i = 1$  **então**

$C_i = p_{Pseq_i}$

**senão**  $C_i = C_{Pseq_{i-1}} + s_{Pseq_{i-1}i} + p_i$

**fim se**

**FIM**

---

A função do Momento de Entrega calcula a data em que uma tarefa é entregue. Esse cálculo é feito a partir da soma do momento de entrega da tarefa imediatamente antecedente, se houver, com o tempo de processamento da tarefa atual e o tempo de *setup* entre esse par de tarefas. O momento de entrega da primeira tarefa de uma sequência é o seu próprio tempo de processamento.

O pseudocódigo Função Atraso apresenta a função que calcula o atraso de uma tarefa.

---

**Pseudocódigo: Função\_Atraso**

Variáveis

$C(), d(), T(), i$

**INÍCIO**

**se**  $C_i - d_i > 0$

$T_i = C_i - d_i$

**senão**  $T_i = 0$

**fim se**

**FIM**

---

A função apresentada no pseudocódigo Função Atraso consiste em calcular o atraso da tarefa  $i$ . Esta função baseia-se em comparar o momento de entrega da tarefa  $i$  com a sua respectiva data de entrega. Se a diferença for negativa, significa que não há atraso e, portanto, o valor do atraso da tarefa é zero. Se a diferença for um valor positivo então, o atraso da tarefa será o valor dessa diferença.

A seguir é descrito o pseudocódigo da Heurística Proposta 1.

**Heurística Proposta 1**

(continua)

---

Variáveis

$d(), p(), s(), n, Tproc(), Pseq(), T(), j, l, i$

**INÍCIO**

**para**  $i = 1$  até  $n$  **faça**

$Pseq_{i,1} = Tarefa_i$

$Flag_i = 1$

**para**  $j = 2$  até  $n$  **faça**

$NG = \infty$

**para**  $l = 1$  até  $n$  **faça**

**se**  $Flag_l \neq 1$  **então**

*Alocar Tarefa<sub>l</sub> na posição j*

$T_l = Função\_Atraso(Pseq_{i,j})$

**se**  $T_l < NG$  **então**

---

**Heurística Proposta 1****(continuação)**


---


$$Pseq_{i,j} = Tarefa_l$$

$$T_l = Função\_Atraso$$

$$NG = T_l$$

**fim se**

**fim se**

**fim para l**

**fim para j**

**fim para i**

**para i = 1 até n faça**

$$T_i = \sum_{j=1}^n Função\_Atraso_{(Pseq_{i,j})}$$

**fim para i**

*imprimir as 3 sequências com os menores valores de Atraso Total.*

**FIM**


---

O Apêndice II contém esse mesmo algoritmo escrito em linguagem computacional C.

**4.4.3.3 Heurística Proposta 2**

A heurística apresentada a seguir é composta pela Heurística Proposta 1 com adição de alguns passos. Esta heurística tem o objetivo de melhorar o resultado obtido pela Heurística Proposta 1. A ideia é encontrar em cada sequência a tarefa que tenha o maior atraso e troca-la de posição com a tarefa que a precede. Os passos que compõem essa heurística são mostrados a seguir:

- i. Aplicar a Heurística Proposta 1;
- ii. Para cada sequência gerada no passo anterior, identificar a tarefa que tenha o maior atraso de cada sequência e selecioná-la;
- iii. Encerrar se a tarefa com maior atraso for a primeira da sequência;
- iv. Inverter a posição atual da tarefa selecionada com a posição da tarefa que imediatamente a precede; e
- v. Calcular o atraso total de cada sequência e elencar a sequência que tenha o menor atraso total.

**Heurística Proposta 2****Variáveis***i, n***INÍCIO***resolver Heurística Proposta 1***para** *i = 1 até n* **então***encontrar na Pseq<sub>i</sub> a tarefa com o maior atraso**se a tarefa com o maior atraso for a primeira da sequencia***fim para** *i**inveter a posição da tarefa com o maior atraso com a tarefa precedente*

$$T_i = \sum_{j=1}^n \text{Função\_Atraso}(P_{seq_{i,j}})$$

**fim para** *i**imprimir os novos valores de Atraso total***FIM**

O Apêndice III contém esse mesmo algoritmo escrito em linguagem computacional C.

**4.5 HARDWARE UTILIZADO**

Para gerar os resultados das heurísticas utilizando os métodos computacionais propostos, foi utilizado um computador com as seguintes características.

- i. Processador Intel® Core™ i7-4500U CPU @ 1,80 GHz;
- ii. RAM 8,00 GB; e
- iii. Sistema Operacional de 64 bits, processador com base em x64.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as soluções geradas pelas heurísticas propostas para os problemas utilizados, bem como as comparações entre os resultados.

### 5.1 TAREFAS SEQUENCIADAS

A partir dos dados de tempo de processamento, prazos de entrega e tempos de *setup* coletados para cada tarefa foi possível utilizar-se das heurísticas propostas no Capítulo 4 para gerar o sequenciamento destas tarefas. Além do sequenciamento das tarefas, as heurísticas retornam também os valores de atraso total das tarefas da sequenciadas.

#### 5.1.1 Dados Coletados

Para o estudo foram coletados os valores de tempo de processamento, os prazos de entrega e os tempos de *setup* das tarefas referentes ao mês de julho, agosto e setembro de 2016. Todos os tempos têm minutos como unidade de tempo. Como as tarefas foram divididas em grupos em relação às suas características, a tabela dos tempos de *setup* pôde ser simplificada com base nessa condição. Uma característica das atividades de cada grupo, é que não existem tarefas iguais dentro de cada grupo. A Tabela 4 apresenta os tempos de *setup* entre os grupos de tarefas.

**Tabela 4 - Tempos de *setup* entre grupos de tarefas**

		Grupo						
De/Para		1	2	3	4	5	6	7
Grupo	1	15	20	25	10	60	45	60
	2	20	5	10	15	60	45	60
	3	20	10	10	20	60	45	60
	4	25	10	10	15	35	35	60
	5	30	10	10	10	25	40	60
	6	25	10	10	15	60	30	60
	7	35	10	10	10	60	50	60

Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 contém os tempos de *setup*, em minutos, entre os grupos das tarefas. Os grupos 1, 2, 3, e 4 possuem tempos de *setups* reduzidos em

comparação aos outros grupos. Isso significa, que iniciar uma tarefa pertencente a um desses grupos exige tempos de *setup* reduzidos em relação aos demais grupos.

Os grupos 5, 6 e 7 possuem poucas características semelhantes. Isso implica em tempos de *setups* maiores entre as atividades desses respectivos grupos.

Foram coletados os dados de todas as tarefas processadas durante os meses de julho, agosto e setembro de 2016. No entanto, nem todas as tarefas serão utilizadas para o sequenciamento via a aplicação de heurísticas. A quantidade de tarefas selecionadas no mês de julho foi de 100 tarefas, que é a quantidade total. A quantidade de tarefas escolhidas do mês de agosto foi de 25 de tarefas e 10 tarefas foram escolhidas no mês de setembro.

O Apêndice IV contém os tempos de processamentos, as datas de entrega e os grupos das atividades das tarefas que foram produzidas durante o mês de julho de 2016.

A Tabela 5 contém os tempos de processamentos, as datas de entrega e os grupos das atividades das 25 primeiras tarefas que foram produzidas durante os três primeiros dias do mês de agosto de 2016.

**Tabela 5 - Tempos coletados mês de agosto**

(continua)

<b>Tarefas</b>	<b>Tempo de processamento (min)</b>	<b>Data de Entrega (min)</b>	<b>Grupo de atividade</b>
<b>1</b>	90	1300	1
<b>2</b>	119	1500	2
<b>3</b>	210	1700	5
<b>4</b>	250	1900	5
<b>5</b>	150	1950	1
<b>6</b>	205	1999	1
<b>7</b>	190	2150	3
<b>8</b>	183	250	4
<b>9</b>	151	358	3
<b>10</b>	151	450	1
<b>11</b>	180	520	5
<b>12</b>	180	650	1
<b>13</b>	127	850	4
<b>14</b>	159	940	1



Tabela 5 - Tempos coletados mês de agosto

(conclusão)			
Tarefas	Tempo de processamento (min)	Data de Entrega (min)	Grupo de atividade
15	170	1100	1
16	210	2950	1
17	230	3250	1
18	250	3300	5
19	190	3500	5
20	76	4000	6
21	190	2350	1
22	180	2450	2
23	190	2560	3
24	180	2680	1
25	195	2760	4

Fonte: Autoria própria

A tarefa com maior data de entrega é a tarefa 20. A data de entrega desta tarefa é aos 4000 minutos que é equivalente a 2,78 dias.

A Tabela 6 mostra os dados de 10 tarefas que deveriam ser produzidas no primeiro dia do mês de setembro.

Tabela 6 - Tempos coletados mês de setembro

Tarefas	Tempo de processamento (min)	Data de Entrega (min)	Grupo de atividade
1	60	854	1
2	49	358	3
3	183	250	4
4	50	1121	1
5	151	421	1
6	104	599	1
7	127	625	4
8	119	1440	2
9	99	528	5
10	60	1328	2

Fonte: Autoria própria

A quantidade de tarefas produzidas durante esse dia é menor, portanto nem todos os grupos de tarefas estão presentes na Tabela 6. A maior data de entrega entre as 10 tarefas é a da tarefa 8.

### 5.1.2 Sequenciamento da Heurística EDD

Os resultados do sequenciamento gerados pela Heurística EDD para o mês de julho são mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Sequenciamento EDD para o mês de julho**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
12	0	23	0	68	394	97	17
11	0	21	27	36	107	99	120
10	0	20	71	35	233	98	162
14	0	9	104	38	0	80	0
13	0	18	141	37	56	81	0
15	0	24	256	41	0	82	17
16	0	8	350	44	0	83	0
26	0	25	120	40	0	100	0
27	0	19	176	42	142	86	0
28	0	52	262	43	335	87	13
17	53	54	0	39	423	85	0
32	0	53	44	45	200	84	0
33	0	57	123	47	0	70	0
31	0	55	289	48	0	69	0
29	101	60	2	50	0	71	0
30	166	59	45	49	0	89	0
1	0	62	122	46	0	88	0
2	2	58	269	92	6	77	0
7	99	56	558	91	91	76	0
34	151	61	624	90	135	72	0
3	241	64	374	51	176	79	0
4	0	63	452	95	0	78	0
6	58	65	513	94	93	75	0
5	116	67	231	96	163	74	0
22	0	66	318	93	329	73	0
<b>Atraso Total: 9670</b>				<b>Tempo Computacional: 0,3 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O sequenciamento gerado pela aplicação da heurística EDD resultou na soma de 9670 minutos de atraso. No total foram 52 tarefas atrasadas nesse sequenciamento. As 52 tarefas atrasadas neste sequenciamento representam 52% de tarefas atrasadas em toda a sequência.

Os resultados do sequenciamento gerados pela Heurística EDD para o mês de agosto são mostrados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Sequenciamento EDD para o mês de agosto**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
8	0	15	371	7	725	17	1120
9	0	1	276	21	735	18	1380
10	65	2	215	23	835	19	1395
11	235	3	285	22	925	20	1011
12	315	4	360	24	1005		
13	252	5	490	25	1130		
14	346	6	661	16	1175		
<b>Atraso Total: 15307</b>				<b>Tempo Computacional: 0,3 s</b>			

Fonte: Autoria própria

No sequenciamento gerado para o mês de agosto apenas duas tarefas não apresentaram atrasos. O atraso total dessa sequência foi de 15307 minutos. No total 92% das tarefas apresentaram atrasos nessa sequência.

O sequenciamento para o mês de setembro é apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9 – Sequenciamento EDD para o mês de setembro**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
7	0	8	44	6	74	9	0
2	0	3	107	10	0		
1	0	5	218	4	0		
<b>Atraso Total: 443</b>				<b>Tempo Computacional: 0,3 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O atraso total do sequenciamento EDD para as dez primeiras atividades mês de setembro resultou em um atraso total de 443 minutos. Nesta sequência 40% das atividades estão atrasadas.

### 5.1.3 Sequenciamento da Heurística Proposta 1

O sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 1 para o mês de julho é apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de julho**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
15	0	1	0	52	22	35	0
10	0	2	0	53	0	36	0
11	0	3	4	54	0	37	0
12	48	4	0	55	0	38	0
13	0	5	0	56	0	39	0
14	0	6	0	57	288	40	0
16	0	7	282	58	80	41	0
17	0	8	0	59	128	42	0
26	0	9	0	60	191	43	9
27	0	18	0	61	252	44	93
28	0	19	0	62	329	45	0
29	0	20	0	63	36	46	0
30	0	21	0	64	142	47	0
31	0	22	21	65	198	48	0
32	0	23	86	66	0	49	0
33	31	24	166	67	3	50	0
34	0	25	0	68	79	51	0
90	0	98	0	85	0	72	0
91	0	99	0	86	0	73	0
92	0	100	0	87	0	74	0
93	0	80	0	88	0	75	0
94	0	81	0	89	0	76	0
95	0	82	0	69	0	77	0
96	0	83	0	70	0	78	0
97	0	84	0	71	0	79	0
<b>Atraso Total: 2488</b>				<b>Tempo Computacional: 1,2 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 1 resultou em um atraso total de 2488 minutos para as tarefas do mês de julho. No sequenciamento gerado pela a Heurística Proposta 1, 80% das tarefas não apresentaram atrasos.

O sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 1 para as tarefas selecionadas para o mês de agosto é apresentado na Tabela 11.

**Tabela 11 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de agosto**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
11	0	15	306	7	660	17	1055
8	123	1	211	21	670	18	1315
9	176	2	150	23	770	19	1330
10	255	3	220	22	860	20	946
12	250	4	295	24	940		
13	187	5	425	25	1065		
14	281	6	596	16	1110		
<b>Atraso Total:</b>		14196		<b>Tempo Computacional: 0,9 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O sequenciamento apresentado na Tabela 11 resultou em um atraso total de 14196 minutos. No total 24 das 25 tarefas sequenciadas por esta heurística apresentaram atrasos.

A Tabela 12 apresenta o sequenciamento feito pela Heurística Proposta 1 para as dez tarefas do mês de setembro.

**Tabela 12 – Sequenciamento da Heurística Proposta 1 para o mês de setembro**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
8	0	1	101	6	9	9	0
7	42	3	42	10	0		
2	0	5	153	4	0		
<b>ATRASSO TOTAL:</b>		347		<b>Tempo Computacional: 0,6 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O atraso total do sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 1 resultou em um atraso de 347 minutos. De todas as tarefas sequenciadas 50% das tarefas não apresentaram atrasos.

#### 5.1.4 Sequenciamento da Heurística Proposta 2

Os resultados do sequenciamento das tarefas do mês de julho gerados pela Heurística Proposta 2 são mostrados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de julho**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
15	0	1	0	52	22	35	0
10	0	2	0	53	0	36	0
11	0	3	4	54	0	37	0
12	48	4	0	55	0	38	0
13	0	5	0	56	0	39	0
14	0	6	0	57	288	40	0
16	0	7	282	58	80	41	0
17	0	8	0	59	128	42	0
26	0	9	0	60	191	44	0
27	0	18	0	61	252	43	128
28	0	19	0	62	329	45	0
29	0	20	0	63	36	46	0
30	0	21	0	64	142	47	0
31	0	22	21	65	198	48	0
32	0	23	86	66	0	49	0
33	31	24	166	67	3	50	0
34	0	25	0	68	79	51	0
90	0	98	0	85	0	72	0
91	0	99	0	86	0	73	0
92	0	100	0	87	0	74	0
93	0	80	0	88	0	75	0
94	0	81	0	89	0	76	0
95	0	82	0	69	0	77	0
96	0	83	0	70	0	78	0
97	0	84	0	71	0	79	0
<b>ATRASSO TOTAL: 2514</b>			<b>Tempo Computacional: 1 s</b>				

Fonte: Autoria própria

A soma dos atrasos das tarefas sequenciadas pela Heurística Proposta 2 foi de 2514 minutos. No total foram 20% das tarefas atrasadas nesta sequência. A tarefa mais atrasada foi a 62, esta tarefa atrasou 329 minutos.

O sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 2 para as tarefas selecionadas para o mês de agosto é apresentado na Tabela 14.

**Tabela 14 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de agosto**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
11	0	15	306	7	660	17	1055
8	123	1	211	21	670	18	1315
9	176	2	150	23	770	20	731
10	255	3	220	22	860	19	1481
12	250	4	295	24	940		
13	187	5	425	25	1065		
14	281	6	596	16	1110		
<b>ATRASO TOTAL: 14132</b>				<b>Tempo Computacional: 0,8 s</b>			

Fonte: Autoria própria

A soma dos atrasos das tarefas sequenciadas pela Heurística Proposta 2 para o mês de agosto foi de 14132 minutos. Neste sequenciamento 24 das 25 tarefas apresentaram atrasos. A tarefa com o maior atraso foi a tarefa 19, esta tarefa apresentou 1481 minutos de atraso.

A Tabela 15 apresenta o sequenciamento para as dez tarefas do mês de setembro.

**Tabela 15 – Sequenciamento da Heurística Proposta 2 para o mês de setembro**

Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso	Tarefa	Atraso
8	0	1	101	5	228	9	0
7	42	3	42	10	0		
2	0	6	0	4	0		
<b>ATRASO TOTAL:</b>		413		<b>Tempo Computacional: 0,5 s</b>			

Fonte: Autoria própria

O atraso total do sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 1 resultou em um atraso de 413 minutos. Neste sequenciamento 4 tarefas apresentaram atrasos. A tarefa 5 apresentou 228 minutos de atraso, fazendo desta tarefa a tarefa com o maior atraso da sequência.

## 5.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após os resultados obtidos nas subseções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 foi possível estabelecer uma comparação dos resultados como é demonstrado na Tabela 16.

**Tabela 16 – Resultados das Heurísticas Desenvolvidas**

Mês	Método		
	EDD	Heurística Proposta 1	Heurística Proposta 2
Julho	9670	2488	2514
Agosto	15307	14196	14132
Setembro	443	347	413

Fonte: Autoria própria

A soma dos atrasos da sequência gerada pela Heurística Proposta 1 foi a menor para o mês de julho. A soma dos atrasos foi de 2488 minutos. O resultado da Heurística Proposta 1 foi 75% menor comparando com o resultado da heurística EDD que foi 9670 minutos.

Para as tarefas selecionadas do mês de agosto o melhor resultado foi o da Heurística Proposta 2. A soma dos atrasos para esse mês foi de 14132 minutos. O sequenciamento gerado pela Heurística Proposta 2 resultou em 7% de atraso total em relação a heurística EDD. E menos de 1% se comparada com a Heurística Proposta 1.

O sequenciamento das dez tarefas do mês de setembro gerado pela Heurística Proposta 1 retornou a soma dos atrasos de 347 minutos. No critério analisado, atraso total, a melhor sequência foi gerada pela Heurística Proposta 1, esta heurística apresentou uma melhoria de 15% em relação ao segundo melhor resultado, e 21% de melhoria em relação ao pior sequenciamento.

### 5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo desse estudo foi encontrar um sequenciamento que retornasse um valor minimizado do atraso total das tarefas a serem processadas num intervalo de tempo determinado. É interessante também ilustrar além do atraso total de cada sequência, outros indicadores como média dos atrasos e o *makespan* da sequência. Para o cálculo da Média de Atraso foi feito o cálculo da média dos atrasos incluindo as tarefas em que o atraso é 0.

A Tabela 17 contém os valores dos indicadores previamente mencionados para o mês de julho.



**Tabela 17 – Análises dos resultados do mês de julho**

<b>Método</b>	<b>Atraso Total (min)</b>	<b>Média de Atraso (min)</b>	<b>Tarefas Atrasadas</b>	<b>Porcentagem de Tarefas Atrasadas</b>	<b>Makespan (min)</b>
<b>EDD</b>	9670	97	52	52%	9474
<b>Heurística Proposta 1</b>	2488	24	20	20%	8989
<b>Heurística Proposta 2</b>	2514	24	20	20%	9029

**Fonte: Autoria própria**

A Heurística Proposta 1 retornou o melhor resultado para o critério de Atraso Total. No sequenciamento da Heurística Proposta 1 o *makespan* foi de 8989 minutos.

Em comparação com a heurística EDD, a Heurística Proposta 1 teve o seu desempenho melhor em todos os critérios analisados. Em comparação com a Heurística Proposta 2, os critérios de atraso total e *makespan* obtidos pela Heurística Proposta 1 foram melhores.

A Tabela 18 contém os valores dos indicadores previamente mencionados para o mês de agosto.

**Tabela 18 – Análises dos resultados do mês de agosto**

<b>Método</b>	<b>Atraso Total (min)</b>	<b>Média de Atraso (min)</b>	<b>Tarefas Atrasadas</b>	<b>Porcentagem de Tarefas Atrasadas</b>	<b>Makespan (min)</b>
<b>EDD</b>	15307	612	23	92%	5011
<b>Heurística Proposta 1</b>	14196	567	24	96%	4946
<b>Heurística Proposta 2</b>	14132	565	24	96%	4981

**Fonte: Autoria própria**

A Heurística Proposta 2 retornou 14132 minutos de soma de atraso. Este valor foi melhor resultado para o critério de Atraso Total. O melhor *makespan* foi gerado pelo sequenciamento da Heurística Proposta 1 que retornou um *makespan* de 4946 minutos.

Apesar da Heurística Proposta 2 ter o menor resultado de atraso total, a porcentagem de tarefas atrasadas gerada por essa sequência foi maior que a quantidade de tarefas atrasadas pela heurística EDD.

A Tabela 19 contém os valores de Atraso Total, Média de Atraso, Tarefas Atrasadas e *Makespan* para o mês de setembro.

**Tabela 19 – Análises dos resultados do mês de setembro**

<b>Método</b>	<b>Atraso Total (min)</b>	<b>Média de Atraso (min)</b>	<b>Tarefas Atrasadas</b>	<b>Porcentagem de Tarefas Atrasadas</b>	<b><i>Makespan</i> (min)</b>
<b>EDD</b>	443	44,3	4	40%	1207
<b>Heurística Proposta 1</b>	347	35	5	50%	1142
<b>Heurística Proposta 2</b>	413	41,3	4	40%	1142

**Fonte: Autoria própria**

O menor resultado de atraso total foi gerado pelo sequenciamento da Heurística Proposta 1. No entanto, este sequenciamento teve uma tarefa atrasada a mais que as outras sequências. Dos 4 critérios analisados, a Heurística Proposta 1 teve o melhor desempenho nos critérios de atraso total e média dos atrasos.

O método de sequenciamento EDD ordena as tarefas em ordem crescente em relação seu prazo de entrega e então sequencia da mesma maneira, já as Heurísticas Propostas 1 e 2 sequenciam as tarefas levando em consideração os tempos de processamento, *setups* e datas de entrega.

Ficou evidente que como os métodos de resoluções das Heurísticas Propostas 1 e 2 são semelhantes os resultados também foram semelhantes. Os números de tarefas atrasadas são semelhantes e as médias dos valores de atraso e o atraso total são muito próximos.

Como as Heurísticas Proposta 1 e 2 retornaram valores de qualidade, com bom desempenho e satisfatórios de atraso total. A solução proposta para o projeto de sequenciamento de tarefas utilizará das duas heurísticas.

## 6 CONCLUSÕES

Neste estudo foi apresentado a construção de modelos para minimização das somas dos atrasos de cada tarefa, atraso total, em um ambiente de máquina única com *setups* dependentes da sequência. O problema encontrado é de uma empresa da região dos Campos Gerais no Paraná que se disponibilizou a fornecer os dados necessários para a modelagem e resolução do problema.

Devido à complexidade do problema encontrado foi escolhido o uso de heurísticas para resolução do problema pois as heurísticas se utilizam de procedimentos e estratégias de resolução para retornar um resultado bom e dentro de um tempo computacional de resolução reduzido.

Antes da formulação das heurísticas foi necessário primeiro modelar o ambiente produtivo. Definir quantas máquinas e processos seriam necessários considerar na hora de formular o problema. Neste caso foi considerado o processo como uma única máquina, além disso foi percebido que de acordo com a sequência que era feita os tempos de *setup* variavam, o que tornou o problema mais complexo.

Para a formulação das heurísticas foi levado em consideração a regra EDD que prioriza as tarefas com menores prazos de entregas (PINEDO, 2004). Além disso os modelos deveriam contemplar também o tempo de *setup* e o tempo de processamento de cada tarefa. A utilização das heurísticas nesse estudo foi devido a maior facilidade em desenvolver um modelo que contemplasse todos os critérios avaliados e a maior rapidez de resolução.

Com um sequenciamento feito de forma a minimizar o atraso total é possível assim então adequar os prazos planejados de entrega com a realidade dos prazos de entregas reais. Para a produção do mês avaliado neste estudo foram propostas duas heurísticas, a Heurística Proposta 1, 2 e foi adaptada a regra EDD para ser utilizada em casos de sequenciamento com tempos de *setup* dependentes da sequência. Foram geradas três instâncias com quantidade de tarefas diferentes para que se pudesse verificar a eficiência de cada método. Desta forma foi avaliada através de uma comparação dos resultados do atraso total obtidos para cada método. Os métodos das Heurísticas Proposta 1 e 2 foram os que retornaram os valores de atraso total minimizados.

Com os resultados satisfatórios encontrados no problema de sequenciamento das tarefas proposto por esse estudo é possível dar início a um projeto de utilização das heurísticas criadas.

É importante mencionar que os resultados encontrados podem não ser os valores ótimos por se tratarem de valores encontrados através de heurísticas e não métodos exatos. Porém, os resultados encontrados já evidenciam que o uso de um método baseado em regras e condições encontrados na literatura é opção que deve ser considerada.

Em estudos futuros as heurísticas propostas podem também considerar o uso de mais iterações que testem mais trocas de posição entre tarefas, bem como o uso de buscas locais para que se encontre melhores valores no resultado final.

Por fim, os métodos elaborados neste estudo obtiveram resultados satisfatórios, com tempos de processamento baixos para resolução do problema e com fácil implementação.

## REFERÊNCIAS

ASKIN, Ronald G.; CHARLES R. Standridge. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. John Wiley & Sons Inc, 1993.

BAKER, Kenneth R.; DAN Trietsch. **Principles of sequencing and scheduling**. John Wiley & Sons, 2013.

BOWDEN, Mari I.; FOX, Richard K. A diagnostic approach to the detection of syntactic errors in english for non-native speakers. **The University of Texas–Pan American Department of Computer Science Technical Report**, 2002.

BROWN, S. I.; MCGARVEY, R. G.; VENTURA, J. A. Total flowtime and makespan for a no-wait m-machine flowshop with set-up times separated. **Journal of the Operational Research Society**, v. 55, n. 6, p. 614-621, 2004.

CHENG, T. C. E.; OĞUZ, C.; QI, X. D. Due-date assignment and single machine scheduling with compressible processing times. **International Journal of Production Economics**, v. 43, n. 2, p. 107-113, 1996.

CHOI, Hyun-Seon; KIM, Ji-Su; LEE, Dong-Ho. Real-time scheduling for reentrant hybrid flow shops: A decision tree based mechanism and its application to a TFT-LCD line. **Expert systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 3514-3521, 2011.

CONCEIÇÃO, Samuel Vieira et al. Desenvolvimento e implementação de uma metodologia para troca rápida de ferramentas em ambientes de manufatura contratada. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 3, p. 357-369, 2009.

CORDENONSI, A.Z. **Ambientes, Objetos e Dialogicidade**: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas. Tese de Doutorado: Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação – UFRGS, 2008.

COSENTINO, Aldo; ERDMANN, Rolf Hermann. Planejamento e controle da produção na pequena e micro empresa do setor de confecções. **Revista de Ciências da Administração**, v. 1, n. 1, p. 53, 1999.

DEWU, Chen; LI, S.; GUOCHUN, Tang. Single machine scheduling with common due date assignment in a group technology environment. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 25, n. 3, p. 81-90, 1997.

FITZSIMMONS, James A.; FITZSIMMONS, Mona J. **Administração de Serviços-: Operações, Estratégia e Tecnologia da Informação**. AMGH Editora, 2014.

de FREITAS FILHO, Paulo José. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**: com aplicações em Arena. Visual Books, 2001.

FUCHIGAMI, Hélio Yochihiro; RANGEL, Socorro. MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA MAXIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TAREFAS JUST-IN-TIME EM FLOW SHOP PERMUTACIONAL. **Relatório Técnico aceito para o SBPO**, 2015.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

HILLIER, Frederick S.; Gerald J. Lieberman. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill, 2016.

HORDONES, Paulo Antônio; CAMARGO, Victor Hugo; FUCHIGAMI, Hélio Yochihiro. Programação da produção em flow shop permutacional envolvendo medidas de atraso: uma contribuição bibliométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. 132., 2016, Vitória. **Anais do XLVIII SBPO**. Vitória: UFES, 2016. p. 132-145.

KODAGANALLUR, Viswanathan; SEN, Anup K.; MITRA, Subrata. Application of graph search and genetic algorithms for the single machine scheduling problem with sequence-dependent *setup* times and quadratic penalty function of completion times. **Computers & Industrial Engineering**, v. 67, p. 10-19, 2014.

MORAIS, Márcia de Fátima et al. Métodos heurísticos construtivos para redução do estoque em processo em ambientes de produção flow shop híbridos com tempos de setup dependentes da sequência. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 2, p. 367-375, 2010.

NAGANO, Marcelo Seido; Miyata, Hugo Hissashi; ARAÚJO, Daniella Araújo. A constructive heuristic for total flowtime minimization in a no-wait flowshop with sequence-dependent setup times. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 36, p. 224-230, 2015.

NETO, Roberto Fernandes Tavares; FILHO, Moacir Godinho. Otimização por colônia de formigas para o problema de sequenciamento de tarefas em uma única máquina com terceirização permitida. **Gestão e Produção**, v. 20, n. 1, p. 76-86, 2013.

PINEDO, Michael. **Planning and scheduling in manufacturing and services**. New York: Springer, 2005.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de Otimização**. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 225 p

RUIZ, Ruben; MAROTO, Concepción. A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent *setup* times and machine eligibility. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 3, p. 781-800, 2006.

SEN, Tapan; GUPTA, Sushil K. A state-of-art survey of static scheduling research involving due dates. **Omega**, v. 12, n. 1, p. 63-76, 1984.

SILVA, Anderson Freitas; OLIVEIRA, Antônio Costa de. Algoritmos genéticos: alguns experimentos com os operadores de cruzamento ("Crossover") para o problema do caixeiro viajante assimétrico. **Anais do XXVI ENEGEP–Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza**, 2006.

SOTSKOV, Yuri N.; GHOLAMI, Omid; WERNER, Frank. Solving a job-shop scheduling problem by an adaptive algorithm based on learning. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 9, p. 1352-1357, 2013.

TAHA, Hamdy Abdelaziz. **An Introduction to Operations Research**. Macmillan, 2008.

TAN, Keah-Choon et al. A comparison of four methods for minimizing total tardiness on a single processor with sequence dependent *setup* times. **Omega**, v. 28, n. 3, p. 313-326, 2000.

XI, Yue. **Heuristic algorithms to minimize total weighted tardiness on the single machine and identical parallel machines with sequence dependent setup and future ready time**. 2013. Tese de Doutorado. The University of Wisconsin-Milwaukee.

YIN, Yunqiang; XU, Dehua. Some single-machine scheduling problems with general effects of learning and deterioration. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 61, n. 1, p. 100-108, 2011.

YING, Kuo-Ching. Minimizing earliness–tardiness penalties for common due date single-machine scheduling problems by a recovering beam search algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, v. 55, n. 2, p. 494-502, 2008.

WANG, Xue-Ru; HUANG, Xue; WANG, Ji-Bo. Single-machine scheduling with linear decreasing deterioration to minimize earliness penalties. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 7, p. 3509-3515, 2011.

WILL M. BERTRAND, J.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.



## APÉNDICE I - Algoritmo EDD

```

void EDD(){
int VetSeq[300];
int i;
int Tprocess;
int AtrasoTotal;
int AA;

for(i=1;i<=NumTar;i++){
    VetAuxiliar[i].ValorInteiro=i;
    VetAuxiliar[i].ValorReal=VetDataEntr[i];
}
OrdenarHS(&VetAuxiliar[1],NumTar); //Função de ordenação
for(i=1;i<=NumTar;i++){
    VetSeq[i]=VetAuxiliar[i].ValorInteiro;
}
for(i=1;i<=NumTar;i++){
    printf("%d ",VetSeq[i]);
}
printf("\n");
for(i=1;i<=NumTar;i++){
    if(i==1){
        Tprocess=VetTprocess[VetSeq[i]];
        if(Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]]<0){
            AtrasoTotal=0;
        }
        if(Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]]>=0){
            AtrasoTotal=Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]];
        }
    }
    if(i!=1){
        Tprocess=Tprocess+MatrTempSetup[VetSeq[i]-
1][VetSeq[i]]+VetTprocess[VetSeq[i]];
        if(Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]]<0){
            AA=0;
        }
        if(Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]]>=0){
            AA=Tprocess-VetDataEntr[VetSeq[i]];
        }
        AtrasoTotal=AtrasoTotal+AA;
    }
}
printf("Atraso total: %d",AtrasoTotal);
}

```

## **APÊNDICE II - Heurística Proposta 1**

```

void Heuristica Proposta 1(){
int i;
int j;
int k;
int l;
int TarAnterior,TempdeProces;
int TarefaFlag[300][300];
int AtrasoTotalAux[300];
int AtrasoTotal[300];
int VarAux;
int NumG;
int TarEsc;
int DatEntrega[300][300];
int Menor;
    for(j=1;j<=NumTar;j++){
        MatrSequ[j][1]=j;
        TarAnterior=j;
        TarefaFlag[j][j]=1;
        TempdeProces=VetTprocess[j];
        DatEntrega[j][j]=TempdeProces;
        AtrasoTotalAux[j]=0;
        AtrasoTotalAux[j]=VetTprocess[j]-VetDataEntr[j];
        if (AtrasoTotalAux[j]<0){
            AtrasoTotalAux[j]=0;
        }
        for(i=2;i<=NumTar;i++){
            NumG=99999999;
            for(l=1;l<=NumTar;l++){
                if (TarefaFlag[j][l]!=1){
                    VarAux=TempdeProces+MatrTempSetup[TarAnterior][l]+VetTprocess[l]-
                    VetDataEntr[l];
                    if (VarAux<=0){
                        VarAux=0;
                    }
                    if(VarAux>=VetDataEntr[l]){
                        VarAux=0;
                    }
                    if(AtrasoTotalAux[j]+VarAux<NumG){
                        NumG=AtrasoTotalAux[j]+VarAux;
                    }
                }
            }
            DatEntrega[j][l]=TempdeProces+MatrTempSetup[TarAnterior][l]+VetTprocess[l];
            TarEsc=l;
        }
    }
    TempdeProces=DatEntrega[j][TarEsc];
    AtrasoTotalAux[j]=TempdeProces-VetDataEntr[TarEsc];
    if(AtrasoTotalAux[j]<0){

```

```

        AtrasoTotalAux[j]=0;
    }
    MatrSequ[j][i]=TarEsc;
    TarAnterior=TarEsc;
    TarefaFlag[j][TarEsc]=1;
}
int ZZ;
AtrasoTotal[j]=0;
for(i=1;i<=NumTar;i++){
    if(DatEntrega[j][i]-VetDataEntr[i]<=0){
        ZZ=0;
    }
    if(DatEntrega[j][i]-VetDataEntr[i]>=0){
        ZZ=DatEntrega[j][i]-VetDataEntr[i];
    }
    AtrasoTotal[j]=AtrasoTotal[j]+ZZ;
}
}
for (j=1;j<=NumTar;j++){
    VetAuxiliar[j].ValorInteiro=j;
    VetAuxiliar[j].ValorReal=AtrasoTotal[j];
}
OrdenarHS(&VetAuxiliar[1],NumTar);
printf("\nSequencias Ordenadas: \n \n");
for(j=1;j<=1;j++){
    for (k=1;k<=NumTar;k++){
        printf(" %d",MatrSequ[VetAuxiliar[j].ValorInteiro][k]);
    }
    printf("\n");
    printf ("Tempo de atraso: %d \n\n",AtrasoTotal[VetAuxiliar[j].ValorInteiro]);
}
}
}

```

### **APÊNDICE III - Heurística Proposta 2**

```

Void Heuristica Proposta 2(){
Heuristica Proposta 2();
int MatrizSeq2[300][300];
  for(i=1;i<=3;i++){
    for(j=1;j<=NumTar;j++){
      MatrizSeq2[i][j]=MatrSequ[VetAuxiliar[i].ValorInteiro][j];
    }
  }
int MatrizAtraso[3][300];
int TarefaMaiorAtraso[300];
int PosAtraso[300];
  for(i=1;i<=3;i++){
    MaiorAtraso[i]=0;
    for(j=1;j<=NumTar;j++){
      if(j==1){
        TempdeProces=VetTprocess[MatrizSeq2[i][j]];
      }
      if(j!=1){
        TempdeProces=TempdeProces+MatrTempSetup[MatrizSeq2[i][j]-
1][MatrizSeq2[i][j]]+VetTprocess[MatrizSeq2[i][j]];
      }

      if(TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]]<0){
        MaiorAtraso[i]=0;
      }
      if(TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]]>=0){
        MaiorAtraso[i]=TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]];
        TarefaMaiorAtraso[i]=MatrizSeq2[i][j];
        PosAtraso[i]=j;
      }
    }
  }
int AA;
  for(i=1;i<=3;i++){
    AA=MatrizSeq2[i][PosAtraso[i]-1];
    MatrizSeq2[i][PosAtraso[i]-1]=TarefaMaiorAtraso[i];
    MatrizSeq2[i][PosAtraso[i]]=AA;
  }
int ZZ;
  for(i=1;i<=NumTar;i++){
    AtrasoTotal[i]=0;
    for(j=1;j<=NumTar;j++){
      if(j==1){
        TempdeProces=VetTprocess[MatrizSeq2[i][j]];
      }
      if(j!=1){
        TempdeProces=TempdeProces+VetTprocess[MatrizSeq2[i][j]]+MatrTempSetup[Matr
izSeq2[i][j]-1][MatrizSeq2[i][j]];

```

```
    }
    if(TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]]<0){
        ZZ=0;
    }
    if(TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]]>=0){
        ZZ=TempdeProces-VetDataEntr[MatrizSeq2[i][j]];
    }
    AtrasoTotal[i]=AtrasoTotal[i]+ZZ;
}

}
printf("\nSequencias: \n");

for(j=1;j<=3;j++){
    printf("\nSequencia: %d.\n",j);
    for(i=1;i<=NumTar;i++){
        printf("%d ",MatrizSeq2[j][i]);
    }
    printf("\n");
    printf("Atraso Seq %d: %d\n",j,AtrasoTotal[j]);
}
}
```



**APÊNDICE IV - Tabela 4** Tempos coletados mês de julho

Tabela 4 – Tempos coletados mês de julho

(continua)

Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade	Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade
1	56	1778	3	18	27	2490	3
2	91	1778	1	19	30	2845	1
3	40	1778	4	20	18	2490	3
4	42	2134	1	21	54	2490	1
5	28	2134	1	22	57	2490	5
6	46	2134	5	23	40	2490	5
7	36	1778	5	24	55	2490	5
8	53	2490	6	25	95	2845	6
9	22	2490	3	26	42	1067	1
10	128	356	4	27	83	1067	2
11	34	356	3	28	56	1067	5
12	106	356	1	29	57	1423	5
13	69	711	5	30	35	1423	1
14	73	711	1	31	67	1423	1
15	89	711	4	32	86	1423	3
16	42	1067	1	33	71	1423	1
17	35	1067	1	34	42	1778	2

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Tempos coletados mês de julho

(continuação)

Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade	Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade
35	65	4624	5	52	65	2845	2
36	57	4624	2	53	57	3201	2
37	55	4980	3	54	41	3201	1
38	68	4980	1	55	116	3201	4
39	53	5335	5	56	239	3557	4
40	42	5335	1	57	18	3201	7
41	76	5335	2	58	86	3557	5
42	160	5335	4	59	38	3557	2
43	177	5335	4	60	57	3557	2
44	74	5335	3	61	56	3557	2
45	102	5691	1	62	16	3557	7
46	42	6402	1	63	53	3912	3
47	28	6047	1	64	85	3912	1
48	45	6047	5	65	41	3912	1
49	121	6402	4	66	71	4268	1
50	18	6402	1	67	58	4268	1
51	21	6402	1	68	15	4268	5

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Tempos coletados mês de julho

				(conclusão)			
Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade	Tarefa	Tempo de processamento	Data de entrega	Grupo de atividade
<b>69</b>	64	8892	2	<b>86</b>	321	8181	4
<b>70</b>	34	8892	3	<b>87</b>	26	8181	1
<b>71</b>	91	8892	1	<b>88</b>	209	9248	4
<b>72</b>	72	9603	5	<b>89</b>	30	9248	5
<b>73</b>	31	9959	2	<b>90</b>	18	6402	3
<b>74</b>	21	9959	1	<b>91</b>	70	6402	1
<b>75</b>	21	9959	1	<b>92</b>	67	6402	1
<b>76</b>	25	9603	1	<b>93</b>	116	6758	4
<b>77</b>	15	9603	1	<b>94</b>	88	6758	4
<b>78</b>	56	9959	1	<b>95</b>	119	6758	4
<b>79</b>	76	9959	1	<b>96</b>	34	6758	5
<b>80</b>	27	7469	5	<b>97</b>	19	7114	1
<b>81</b>	37	7469	5	<b>98</b>	16	7114	1
<b>82</b>	36	7469	5	<b>99</b>	53	7114	4
<b>83</b>	155	7825	4	<b>100</b>	53	7825	1
<b>84</b>	70	8536	5				
<b>85</b>	31	8536	4				

Fonte: Autoria própria