



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia de Produção



Trabalho de Conclusão de Curso

APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO NO SEQUENCIAMENTO DE UM EQUIPAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO DE ESTOQUE EM UMA USINA SIDERÚRGICA DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Tainara Kesse da Silva

João Monlevade, MG
2021

Tainara Kesse da Silva

**APLICAÇÃO DE UM MODELO
MATEMÁTICO NO SEQUENCIAMENTO DE
UM EQUIPAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO
DE ESTOQUE EM UMA USINA
SIDERÚRGICA DO ESTADO DE MINAS
GERAIS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Tainara Kesse da .
Aplicação de um modelo matemático no sequenciamento de um
equipamento de movimentação de estoque em uma usina siderúrgica do
estado de Minas Gerais. [manuscrito] / Tainara Kesse da Silva. - 2021.
39 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augusto de Oliveira Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de
Produção .

1. Manuseio e transporte de materiais . 2. Modelos matemáticos. 3.
Pesquisa operacional. 4. Processo decisório. 5. Programação linear. I.
Silva, Thiago Augusto de Oliveira. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Tainara Kesse da Silva

Aplicação de um modelo matemático no sequenciamento de um equipamento de movimentação de estoque em uma usina siderúrgica do estado de Minas Gerais

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 04 de fevereiro de 2021

Membros da banca

Prof. Dr. - Thiago Augusto de Oliveira Silva - Orientador(a) - DEENP/ICEA/UFOP

Prof. Dr. - Alexandre Xavier Martins- DEENP/ICEA/UFOP

Prof. Dr. - Paganini Barcellos de Oliveira- DEENP/ICEA/UFOP

Prof. Dr. - Gilberto Miranda Júnior- DEENP/ICEA/UFOP

Thiago Augusto de Oliveira Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/02/2021



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Augusto de Oliveira Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/02/2021, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0136967** e o código CRC **2175B4E3**.

Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho corresponde à finalização de um ciclo único e muito importante na minha vida e, nada disso seria possível sem o amor e o cuidado de Deus. Por isso, em primeiro lugar, agradeço a Ele por tudo que fez e faz por mim, Ele é a minha força e esperança. Agradeço, também, à minha mãe e à minha vó por serem minha base e me apoiarem tanto nessa jornada. Aos meus irmãos por todo estímulo e ajuda sempre que precisei. À Dona Nélia, em memória, por sempre me incentivar nos estudos. Aos meus amigos por tornarem essa caminhada mais leve e feliz.

Aos professores da UFOP, que tanto me inspiraram e ensinaram. Em especial, ao Thiago, meu orientador, por toda dedicação, sabedoria e por tornar a realização deste trabalho possível. Admiro cada um de vocês, o conhecimento é, de fato, um agente de transformação. Foram tantas pessoas que contribuíram para realização desse sonho, deixo aqui meu profundo agradecimento e carinho por vocês!

"Entenda os seus medos, mas jamais deixe que eles sufoquem os seus sonhos."

Alice no País das Maravilhas

Resumo

A movimentação de material no contexto das organizações envolve custos que estão relacionados às ferramentas e estratégias adotadas nos diversos níveis de planejamento e operação. Desta forma, esta pesquisa busca desenvolver um modelo matemático, a partir da Programação Linear Inteira Mista, para o sequenciamento de uma ponte rolante, equipamento utilizado para movimentação de carga suspensa, a fim de reduzir as distâncias percorridas em um galpão de acabamento de uma usina siderúrgica. Para a realização deste estudo, foi feita, inicialmente, a definição do problema de forma conceitual e, posteriormente, a construção do modelo. A partir dos resultados obtidos com a instância criada, nota-se que a utilização da Pesquisa Operacional para o sequenciamento de um equipamento único pode apresentar ganhos para a empresa, visto que considera os menores percursos dentro do espaço de armazenamento e o atendimento à demanda nos períodos de tempo. Entretanto, as limitações do modelo devem ser consideradas, como, por exemplo, a complexidade computacional e o alto volume de dados para tomada de decisão.

Palavras-chave: Movimentação de material, Sequenciamento de um único recurso, Programação Linear Inteira Mista, Tomada de decisão.

Abstract

The material movement in the organization context involves costs that are related to the tools and strategies adopted at different levels of planning and operation. In, therefore, this research objects to develop a mathematical model, from Mixed Integer Linear Programming to the sequencing of a crane, an equipment used to move a suspended material, to reduce the covered distance in a finishing hangar in a steel mill. This study initially was done a conceptual definition of the problem and, then, the building of a model. Starting from the results obtained with instance created is notable that the use of Operational Research to the sequencing of single equipment can mean relevant gains to the company, considering the minor route inside the storage area and the meeting of the demand in time. However, the model limitations should be considered, as, for example, computational complexity and the intensive-data to decision making.

Keywords: Material movement, Single machine scheduling, Mixed Integer Linear Programming, Decision making.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Localização dos estoques na cadeia de suprimentos	4
Figura 2 – MRP e os níveis de estoques	6
Figura 3 – Custos dos estoques	6
Figura 4 – Processamento de tarefas em uma máquina única	13
Figura 5 – Processo de modelagem	15
Figura 6 – Processo de produção	18
Figura 7 – Leiaute do acabamento	19
Figura 8 – Movimentação da ponte rolante no galpão para a instância utilizada . .	26
Figura 9 – Atividade da ponte rolante	29

Lista de tabelas

Tabela 1 – Despesas com a estocagem de material	7
Tabela 2 – Sistemas e equipamentos de manuseio	8
Tabela 3 – Capacidade de carregamento da ponte rolante	20
Tabela 4 – Conjuntos	20
Tabela 5 – Parâmetros	21
Tabela 6 – Variáveis	21
Tabela 7 – Distâncias entre as posições	24
Tabela 8 – Estoque inicial nas posições	24
Tabela 9 – Entrada de material por período de tempo	25
Tabela 10 – Demanda de material por período de tempo	25
Tabela 11 – Dimensão de cada baia	25
Tabela 12 – Movimentação de cantoneira a partir de $p1baia1$ por período	33
Tabela 13 – Movimentação de cantoneira a partir de $p1baia2$ por período	33
Tabela 14 – Movimentação de cantoneira a partir de $p2baia1$ por período	33
Tabela 15 – Movimentação de cantoneira a partir de $p2baia2$ por período	34
Tabela 16 – Movimentação de cantoneira a partir de $p3baia1$ por período	34
Tabela 17 – Movimentação de perfil a partir de $p1baia1$ por período	34
Tabela 18 – Movimentação de perfil a partir de $p2baia1$ por período	35
Tabela 19 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p1baia1$ por período	35
Tabela 20 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p1baia2$ por período	35
Tabela 21 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p2baia1$ por período	36
Tabela 22 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p2baia2$ por período	36
Tabela 23 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p3baia1$ por período	37
Tabela 24 – Quantidade movimentada de perfil a partir de $p1baia1$ por período . .	37
Tabela 25 – Quantidade movimentada de perfil a partir de $p2baia1$ por período . .	37
Tabela 26 – Quantidade de cantoneira na posição por período	38
Tabela 27 – Quantidade de perfil na posição por período	38
Tabela 28 – Ocupação integral da posição p por período	39
Tabela 29 – Ocupação da posição acima de p por período	39

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	Justificativa	2
1.3	Organização do Trabalho	3
2	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1	Gestão de Estoques	4
2.2	Armazenamento e Manuseio de Materiais	7
2.3	Sequenciamento de Tarefas	8
2.4	Programação Linear	10
2.4.1	Programação Linear Inteira Mista	12
2.5	Estudos semelhantes	12
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	15
3.1	Definição do Problema	15
3.2	Construção do Modelo	16
3.3	Solução do Modelo	17
3.4	Validação do Modelo	17
3.5	Definição e Análise dos Dados	17
4	APRESENTAÇÃO DO MODELO	18
4.1	O Problema	18
4.2	O Modelo	20
4.2.1	Conjuntos	20
4.2.2	Parâmetros	21
4.2.3	Variáveis	21
4.2.4	Função Objetivo	22
4.2.5	Restrições	22
5	ANÁLISE E RESULTADOS	24
5.1	Instância utilizada	24
5.2	Resultados Obtidos	25
5.2.1	Movimentação da Ponte Rolante	26
5.2.2	Volume por Posição	27

5.2.3	Quantidade de Material Movimentada	27
5.2.4	Ocupação da Posição	28
5.2.5	Relação com o OEE	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	30
	REFERÊNCIAS	31
A	RESULTADOS PARA A INSTÂNCIA CRIADA	33

1 Introdução

Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi (2010) salientam que, tradicionalmente, na cadeia de suprimentos, há compras de insumos, processamento de produtos em uma ou mais etapas, armazenamento temporário em depósitos e, por fim, o transporte para clientes. Considerando a existência dos estoques nessas diversas etapas, é fundamental que decisões no nível operacional sejam tomadas constantemente. Sendo assim, definições acerca das movimentações e armazenamento de estoque são cruciais no curto prazo e implicam no bom desempenho das operações. Segundo Gianesei e Biazzi (2011), o objetivo dos estoques no processo se dá em função da necessidade de atendimento da demanda a partir de um meio de suprimento.

As organizações, mais do que nunca, buscam reduzir seus custos e elevar o nível de serviço ao cliente. Desta forma, os estoques podem ser grandes aliados ou vilões no atendimento dos objetivos da função de produção (qualidade, custo, rapidez, flexibilidade e confiabilidade). Para Slack et al. (2013), o estoque pode ser definido como o acúmulo de materiais, artifícios e outros elementos, como dados e informações, e até mesmo clientes, em algumas situações.

A partir dos níveis de estoques e estruturação dos processos, as empresas devem definir como e onde os materiais devem ser alocados e movimentados. Neste contexto, tem-se a atuação de uma empresa do ramo siderúrgico, localizada no estado de Minas Gerais, caracterizada pela produção empurrada que, a partir de previsões, busca atender às demandas de mercado. E, para tal, entre as fases do processo de produção, deve estocar e manusear os materiais nos canais de suprimento a fim de serem trabalhados posteriormente, visando a entrega no cliente, conforme suas necessidades e exigências.

A organização estudada é uma usina integrada, que apresenta todos os processos de produção: redução, refino e laminação. Não obstante, a fim de garantir algumas funcionalidades de determinados produtos laminados e promover a formatação da embalagem, há um processo subsequente de acabamento *off-line*. Dada à configuração do processo de acabamento, há um galpão de armazenamento de estoque intermediário com o intuito de abastecer as máquinas de produção. Todavia, o espaço é limitado e as movimentações realizadas podem gerar alto custo para o sistema produtivo, do ponto de vista da utilização do equipamento em operação e, conseqüentemente, da responsividade da cadeia produtiva.

Assim sendo, Ballou (2007) afirma que a manuseio de materiais compreende operações de carregamento e descarregamento, movimentação de itens de e para um ou vários locais dentro de um determinado espaço e engloba, também, a separação de mercadorias. Desta maneira, a Pesquisa Operacional (PO) pode auxiliar nos resultados das empresas, visto que apoia a tomada de decisão. Mesquita e Santoro (2004) destacam que as áreas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e logística demonstram

elevado potencial para utilização de modelos de otimização, entretanto, a aplicação da PO em tais áreas apresenta algumas dificuldades práticas. Outrossim, Hillier e Lieberman (2013) sustentam que a PO é utilizada em problemas que visam conduzir e coordenar as operações nas organizações.

A aplicação da PO no nível operacional, mais precisamente, nas atividades de sequenciamento pode apresentar oportunidades e, também, dificuldades operacionais. O sistema de manuseio de materiais, então adotado pela organização estudada, é constituído por um único equipamento de movimentação de carga suspensa, que deve, portanto, realizar todas as movimentações dentro de um espaço delimitado.

Considerando a chegada constante de material para o acabamento, as movimentações realizadas pelo eletroímã, sustentado pela ponte rolante, equipamento responsável pelo manuseio e armazenamento de estoque intermediário, são frequentes e ocorrem em um curto período de tempo. Nesse sentido, como é possível sequenciar este recurso de modo a reduzir as distâncias percorridas no galpão?

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Construir um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista capaz de auxiliar no sequenciamento de um equipamento de movimentação de materiais laminados em um galpão de acabamento de uma usina siderúrgica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Construir um modelo matemático para movimentação de uma máquina única;
- ✓ Implementar o modelo computacionalmente;
- ✓ Criar uma instância para o modelo proposto;
- ✓ Analisar os resultados gerados a partir de uma abordagem prática;
- ✓ Avaliar as limitações do modelo.

1.2 Justificativa

A utilização da PO em problemas logísticos ou de produção possibilita vantagens como redução de tempo, custo, movimentações e, paralelamente, ocasiona maior satisfação dos clientes internos ou externos. Desta maneira, desenvolver e aplicar um modelo matemático capaz de reduzir as distâncias percorridas de um recurso único e fundamental no processo garante maior eficiência operacional.

Tendo em vista o grau de utilização, as paradas para manutenção do equipamento e o número de movimentação *versus* demanda atendida, a utilização da PO para definição dos movimentos a serem realizados pela ponte rolante pode trazer ganhos de produtividade significativos ao processo.

A utilização de ferramentas computacionais na tomada de decisão colabora para melhores previsões e assertividade das operações. Além disso, subsidia importantes KPI's (*Key Performance Indicators*) da organização, como o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), indicador que mede a eficiência da máquina.

Suzano e Gamberini (2020) salientam que o OEE busca medir o desempenho do equipamento a partir do critério de disponibilidade, performance e qualidade. Para os autores, o aumento da eficiência das máquinas está relacionado à realização de atividades e procedimentos que promovam o aumento da produtividade e disponibilidade e, em contrapartida, possibilitem a redução de refugo e retrabalho. Além disso, Suzano e Gamberini (2020) expõem que sob a ótica da disponibilidade, as perdas ocorrem em função da quebra do equipamento e tempo de *setup*. O índice de qualidade, por outro lado, refere-se a perdas devido ao retrabalho, refugo e queda de rendimento. A performance, por sua vez, está atrelada a fatores de ociosidade, pequenas paradas e redução de velocidade.

1.3 Organização do Trabalho

O presente estudo foi dividido em seis capítulos, o Capítulo 1 tem o intuito de apresentar o tema, com a problemática, objetivos da pesquisa e justificativa, com a relevância do trabalho. O Capítulo 2 busca desenvolver um aporte teórico com trabalhos da literatura e conceitos para embasar a pesquisa. O Capítulo 3 busca classificar o tipo da pesquisa e descrever o passo a passo utilizado para o desenvolvimento do estudo. O Capítulo 4, por sua vez, apresenta o modelo matemático criado para representar o problema abordado. O Capítulo 5 evidencia os resultados gerados a partir da instância utilizada. O Capítulo 6 apresenta as considerações obtidas a partir deste estudo, com as limitações e oportunidades de trabalhos futuros.

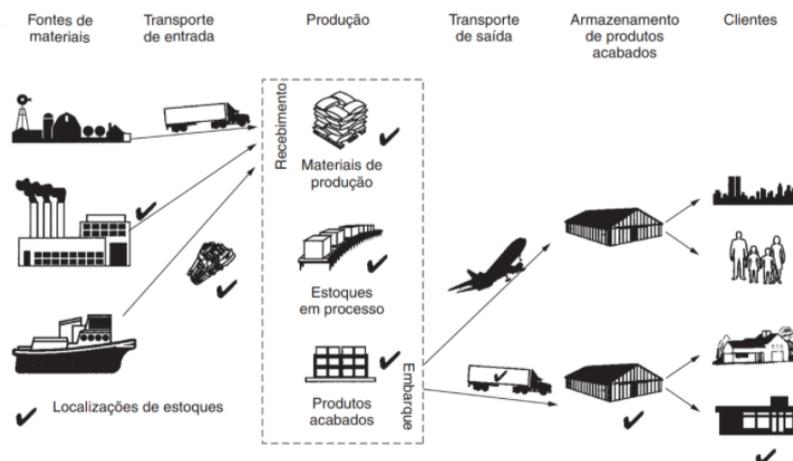
2 Revisão de literatura

2.1 Gestão de Estoques

Para Ballou (2007), estoques correspondem à acumulação de recursos transformados e transformadores, como matérias-primas, materiais em processo e máquinas, que surgem nas diversas posições das vias de produção e logística das organizações. Os estoques são, sem dúvida, cruciais para uma boa coordenação da cadeia de suprimentos, uma vez que garante a manutenção dos processos produtivos, o atendimento às demandas previstas e cumprimento de prazos.

A Figura 1 ilustra a localização dos estoques nas diversas etapas da cadeia de produtiva. Segundo Ballou (2007), os estoques podem ser armazenados em pátios, chão de fábrica, equipamentos de transporte, etc., e assumem um custo de manutenção de 20 a 40% do seu valor.

Figura 1 – Localização dos estoques na cadeia de suprimentos



Fonte – Ballou (2007, p. 272)

Chiavenato (2014) afirma que os materiais sofrem modificações no decorrer do sistema produtivo e, assim, podem assumir cinco denominações diferentes, sendo elas:

- **Matérias-primas:** Também denominadas insumos, são os itens primários do processo produtivo;
- **Materiais em processamento:** São os materiais encontrados em vias que, posteriormente, serão utilizados nos diversos setores que constituem o processo produtivo. Esses materiais são integrados ao processo como matérias-primas e seguem as etapas do sistema de produção a fim de serem transformados;

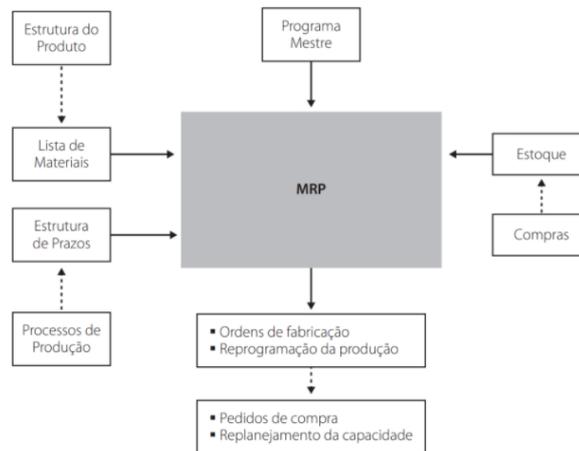
- **Materiais semiacabados:** São os materiais que se encontram em estágio mais avançado de transformação e, assim, necessitam apenas de um acabamento;
- **Materiais acabados ou componentes:** São peças ou componentes acabados que constituirão o produto final;
- **Produtos acabados:** Materiais prontos para serem comercializados.

Desta forma, nota-se que os estoques são estratégicos para as organizações e desempenham funções distintas. Chiavenato (2014) aponta que os estoques têm o intuito de promover a continuidade das atividades e do funcionamento das instituições, reduzindo os impactos decorrentes do atraso no fornecimento e escassez de insumos e, também, resguardar as organizações das flutuações nos canais de suprimento. Além disso, outra finalidade apontada pelo autor é a obtenção de economia de escala a partir dos processos de compra, da produção em lotes econômicos ou pela capacidade de adequação e flexibilização no processo produtivo.

Nesse sentido, a gestão de estoques diz respeito a um conjunto de atividades e operações que visam planejar e coordenar todo o fluxo de materiais das organizações. Chiavenato (2014) salienta que a gestão de estoques abrange procedimentos que vão do planejamento até o controle dos produtos, como aquisição, entrada e expedição, realização de inventário, movimentação e transporte de materiais entre as etapas do processo. A gestão dos estoques é, portanto, repleta de *trade-offs*, uma vez que as empresas precisam trabalhar, de modo paralelo, o nível de serviço ao cliente, o aumento dos lucros e a redução de seus custos.

Nas empresas caracterizadas pelos sistemas empurrados, os níveis de estoques são definidos a partir no *Material Requirement Planning* (MRP), tendo com base os históricos de venda para previsões de demanda, políticas de estoque e volumes de estoques existentes. A Figura 2 exibe o processo do cálculo de necessidade, com suas implicações e interferências na posição dos estoques.

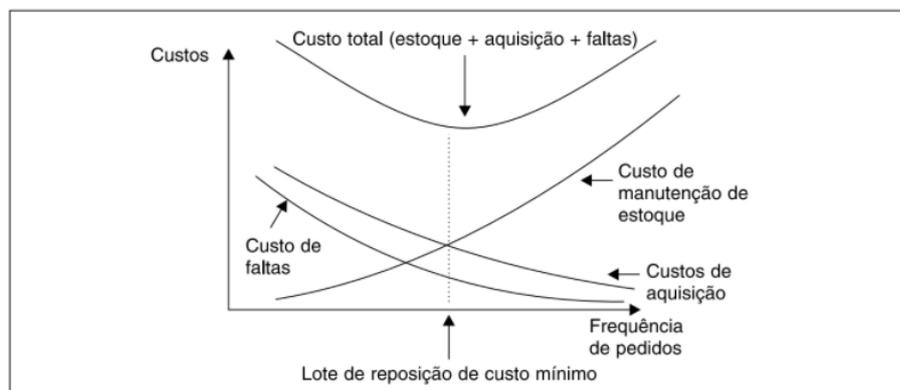
Figura 2 – MRP e os níveis de estoques



Fonte – Lozada, Rocha e Pires (2017, p. 65)

Para Ching (2010), alguns problemas de controle de estoques estão presentes em todos os sistemas produtivos, sendo eles: custos associados aos estoques; objetivos do estoque e previsão de incertezas. Segundo o autor, os custos associados aos estoques podem ser classificados em custo de pedir; custo de manter estoque e custo total. A Figura 3 ilustra os custos associados ao estoque, visando, assim, a minimização do custo total.

Figura 3 – Custos dos estoques



Fonte – Ching (2010, p. 15)

Ching (2010) também afirma que os objetivos do estoque podem ser divididos em objetivos de custo, com os quais se busca equilibrar os custos de pedir e manter estoque e objetivos de nível de serviço, que são mais difíceis de serem mensurados, visto que há um aspecto intangível do impacto que a falta de estoque pode gerar para as organizações. Ademais, a previsão de incertezas refere-se à falta de coordenação na cadeia de suprimentos e a incapacidade de previsão de *lead time* e consumo por parte do mercado.

2.2 Armazenamento e Manuseio de Materiais

Segundo Ballou (2007), o armazenamento e a movimentação de materiais ocorrem em pontos estratégicos da cadeia de suprimentos. E, para o autor, o sistema de estocagem pode ser dividido em estocagem e manuseio. O manuseio de materiais compreende todo o processo de movimentação de um local para o outro, de carga e descarga, classificação, seleção e distribuição de produtos. A estocagem, por sua vez, diz respeito ao acúmulo de material em uma das etapas do processo, em função do tempo. Desta maneira, os produtos podem permanecer estocados por uma fração de tempo variável, dependendo, portanto, dos objetivos definidos pela organização.

Ballou (2007) ainda expõe que o armazenamento e movimentação de materiais exercem grande influência no *lead time*, visto que podem interferir no tempo de processamento dos produtos, acarretando atrasos na expedição ou continuidade do material no fluxo produtivo. Chiavenato (2014) diz que o estoque existe para atendimento das necessidades futuras, logo, o tempo de estocagem pode acarretar em maiores custos, uma vez que exige espaço para estocagem, mão de obra e é, também, dinheiro parado. A Tabela 1 exemplifica as despesas advindas da estocagem de material.

Tabela 1 – Despesas com a estocagem de material

Aluguel do espaço do depósito
Salários do pessoal do depósito
Seguro contra incêndio e roubo
Máquinas e equipamentos de movimentação
Despesas financeiras de estoque

Fonte – Chiavenato (2014)

Platt (2013) apresenta a movimentação de materiais como o fluxo e manuseio de materiais que visam evitar o retrabalho, minimizar as distâncias, garantir a continuidade do processo, evitando, assim, os gargalos, desperdícios, desvios e refugo. O manuseio de materiais tem um custo atrelado a sua realização e, em alguns casos, não agrega valor ao produto, deste modo, o autor salienta que o processo de manuseio deve ser devidamente planejado e executado de modo satisfatório. Giacomelli e Pires (2016) demonstram que os sistemas de manuseio podem ser classificados de três formas distintas:

- **Sistemas mecanizados:** Utilizam diversos equipamentos de manuseio, como empilhadeiras, esteiras rolantes, etc. Neste tipo de sistema, a mão de obra pode ser utilizada concomitante a fim de apoiar o processo de recebimento, carregamento e processamento de materiais. É o tipo de sistema mais comum dentre os existentes;
- **Sistemas semiautomatizados:** São caracterizados pela utilização de mecanismos semiautomáticos, como robótica, separação automatizada, dentre outros;

- **Sistemas automatizados:** São sistemas que carecem de baixa mão de obra. Há forte presença da automação, que garante maior agilidade e menor incidência de erros no processo. A tecnologia da informação é de suma importância para o funcionamento deste tipo de sistema;
- **Sistemas orientados pela informação:** Esses sistemas apresentam características dos sistemas automatizados e mecanizados. Utilizam a tecnologia da informação como ferramenta de controle. As etiquetas inteligentes, RFID (*Radio Frequency Identification*), são exemplos deste tipo de sistema.

A Tabela 2 apresenta os tipos de sistemas de manuseio e alguns exemplos de equipamento de controle e orientação. Platt (2013) enfatiza que a definição dos equipamentos móveis a serem utilizados na movimentação de cargas e o arranjo dos produtos no estoque deve ser embasada pela distância entre os pontos, a intensidade do fluxo e o custo total.

Tabela 2 – Sistemas e equipamentos de manuseio

Tipos de sistemas	Equipamentos
Sistemas mecanizados	Empilhadeiras Transportadores a cabo Veículos de reboque Esteiras rolantes Carrosséis
Sistemas semiautomatizados	Veículos guiados automaticamente (AGV) Separação automatizada (esteiras rolantes combinadas) Robótica Prateleiras móveis
Sistemas automatizados	Sistemas projetados Separação automatizada Sistemas de estocagem e coleta automatizados
Sistemas orientados pela informação	RF sem fio e RFID Separação por luz

Fonte – Giacomelli e Pires (2016)

Por outro lado, Giacomelli e Pires (2016) afirmam que o armazenamento de materiais busca apoiar o processo de produção; coordenar oferta e demanda; colaborar no processo de vendas e minimizar os custos de produção e transporte. Não obstante, o leiaute exerce grande influência nas funções de armazenagem, logo, deve ser favorável ao tipo de produto e recursos existentes da empresa de modo a atender às necessidades.

2.3 Sequenciamento de Tarefas

O *scheduling*, conforme Fuchigami e Rangel (2014), é uma atividade do nível operacional e está atrelada à utilização dos recursos de forma eficiente, à entrega dos produtos nos prazos acordados e menores custos de produção. Deste modo, define-se o

sequenciamento como a sequência em que as tarefas são realizadas em um recurso com capacidade limitada. Pinedo (2008) classifica os problemas de *scheduling* como:

- **Máquina única:** Uma única máquina para realizar o processamento das tarefas;
- **Máquinas idênticas paralelas:** As tarefas podem ser realizadas em qualquer uma das máquinas;
- **Máquinas em paralelo com diferentes velocidades:** As máquinas possuem velocidades de processamento diferentes;
- **Máquinas não relacionadas em paralelo:** Máquinas diferentes nas quais as tarefas são executadas;
- **Flow shop:** As máquinas são dispostas em série e as tarefas são realizadas em cada uma das máquinas (fluxo linear);
- **Flow shop flexível:** Apresenta estágios de processamento e cada tarefa pode ser designada a qualquer uma das máquinas em cada um dos estágios;
- **Job shop:** As tarefas têm rotas estabelecidas;
- **Job shop flexível:** Vários centros de trabalhos com duas ou mais máquinas paralelas disponíveis (a tarefa passa por todos os centros, mas em apenas uma das máquinas);
- **Open shop:** As tarefas não têm roteiro de produção, podem passar em uma ou mais máquinas;
- **Sequência dependente do setup:** O tempo de setup define a sequência das tarefas;
- **Permutação:** A sequência das tarefas é mantida em todas as máquinas do sistema.

Pinedo (2008) ainda afirma que o *scheduling* refere-se à alocação de recursos para atividades em períodos de tempo pré-estabelecidos e seu objetivo pode, portanto, buscar a otimização de uma ou mais funções de produção. Nesse sentido, Lage (2019) expõe que o *scheduling* pode ser dividido em atividades de alocação, sequenciamento e programação e é, portanto, uma atividade que pode ocasionar a geração de filas, estoques indevidos, atrasos e, também, a redução dos lucros. Entretanto, é uma atividade que exige a conciliação dos objetivos com as restrições operacionais, ocorrência de falhas e incertezas de atendimento. Lage (2019) destaca que as regras de sequenciamento podem ser catalogadas como:

- **Primeiro que Entra, Primeiro que Sai (PEPS) ou First-In First-Out (FIFO):** O sequenciamento é definido segundo a chegada dos pedidos, desta maneira, o processamento ocorre a partir da ordem de chegada, os primeiros pedidos que chegam, são os primeiros a saírem;

- **Menor tempo de processamento:** O sequenciamento é determinado a partir do tempo de processamento, ou seja, as tarefas que possuem menor tempo de processamento são as primeiras a serem processadas. Há uma disposição progressiva dos tempos de processamento;
- **Menor tempo de processamento ponderado:** As atividades são sequenciadas mediante relação de impacto entre o tempo de processamento e o seu peso, ou seja, a ordem das tarefas seguem o menor tempo de processamento e o valor que gera ao negócio. Atualmente, as empresas trabalham com o conceito de categorias para os clientes (ouro, prata e bronze) e, assim, tarefas destinadas aos clientes prioritários serão realizadas de modo preeminente, considerando seu tempo de processamento;
- **Data de entrega mais próxima:** O sequenciamento é estabelecido conforme as datas de entrega, ou seja, a sequência é definida a partir de uma ordenação crescente da data entrega, logo, as atividades com datas de entregas próxima serão as primeiras a serem processadas;
- **Razão crítica ou *Critical Ratio* (CR):** O sequenciamento ocorre segundo ordem crescente de razão crítica, calculada conforme a equação 2.1:

$$CR = \frac{\text{data de entrega} - \text{data atual}}{\text{tempo de processamento da tarefa}} \quad (2.1)$$

Conquanto, Santos et al. (2020) acrescentam o UEPS (Último Entra, Primeiro que Sai) ou *Last in, First Out* (LIFO) como uma regra de priorização que realiza, primeiramente, a última a tarefa a chegar. Esse tipo de organização pode ser utilizado em algumas aplicações práticas, como o empilhamento de pedidos ao passo que chegam e ficam no topo da pilha.

Ainda segundo Santos et al. (2020), a programação em uma máquina única, na maioria dos casos, segue a regra do menor tempo de processamento, a fim de minimizar o tempo de fluxo, e menor data de atendimento, visando reduzir os atrasos. Lozada (2017) ressalta que um sistema de produção pode apresentar diversas tarefas ou *jobs* que concorrem aos mesmos recursos e, assim, a sequência de atendimento interfere no tempo de processamento total. Para a autora, os objetivos do sequenciamento são: atendimento de prazos; redução do tempo de atendimento; diminuição do tempo e custos de preparação; redução do estoque de material em processo e maximização da utilização dos equipamentos e mão de obra.

2.4 Programação Linear

A programação linear (PL), segundo Loesch e Hein (2009), consiste na solução de problemas que têm como objetivo maximizar ou minimizar uma função de lucro ou de custo. Esses problemas são formulados a partir de um conjunto de restrições e relações lineares.

Longaray (2013) apresenta a linearidade como uma relação descrita na Equação 2.2, onde a variável y é caracterizada como dependente de x , variável independente. Neste caso, alterações nos valores de x , que implicam em variações constantes em y , são caracterizadas como relações lineares.

$$y = f(x) \quad (2.2)$$

Hillier e Lieberman (2013) expõem que a PL busca resolver problemas de alocação de tarefas em recursos limitados de forma ótima. A descrição do problema, com a PL, ocorre por meio da modelagem matemática e a solução retornada é, portanto, o melhor resultado encontrado dentre as alternativas viáveis. A PL é uma ferramenta da Pesquisa Operacional utilizada em modelos determinísticos que, para Favero e Belfiore (2013), são descritos por variáveis constantes e conhecidas. Os autores apontam um modelo geral de programação matemática com o objetivo de maximizar ou minimizar a função 2.3:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

Subject to:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_1 \quad (2.4)$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_2 \quad (2.5)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad (2.6)$$

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_m \quad (2.7)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.8)$$

As funções 2.4-2.7 são, portanto, restrições do sistema, que garantem o cumprimento das premissas impostas na formulação do problema, como a utilização de recurso, o atendimento da demanda, entre outros. A restrição 2.8, por sua vez, assegura a não negatividade das variáveis de decisão do modelo analisado. Os problemas de PL são caracterizados, segundo Favero e Belfiore (2013), por variáveis contínuas, podendo, então, assumir quaisquer valores do conjunto dos números reais. Nesse sentido, Goldbarg, Luna e Goldbarg (2015) afirmam que os modelos de PL possuem os seguintes atributos:

- **Proporcionalidade:** As quantidades consumidas ou distribuídas para uma determinada tarefa devem ser proporcionais ao nível da operação final. Há, desta forma, uma relação linear entre o custo e nível de operação de cada *job*;
- **Não Negatividade:** As variáveis não podem assumir valores negativos;
- **Aditividade:** A soma das partes é equivalente ao todo;
- **Separabilidade:** Os valores das variáveis de interesse podem ser determinados de modo independente.

A programação linear, como ferramenta de resolução de problemas, deve ser aplicada a partir da definição dos parâmetros e restrições dos sistemas observados. Sendo, então, um meio quantitativo de grande aplicabilidade nas empresas e outras entidades de estudo, onde há um objetivo ou finalidade bem estabelecidos para minimização ou maximização de algum fator de interesse (custo, distância percorrida, tempo de atendimento etc.).

2.4.1 Programação Linear Inteira Mista

Hillier e Lieberman (2013) destacam que há situações nas quais o uso da Programação Linear (PL) não é suficiente para construir um modelo que faça sentido, dado que algumas variáveis podem assumir apenas valores inteiros. Segundo os autores, para as situações em que a necessidade de se utilizar variáveis inteiras é o único elemento que distancia a formulação matemática da PL, caracteriza-se, então, o problema como de Programação Inteira (PI).

Hillier e Lieberman (2013) ainda afirmam que nos problemas de PI é adicionada uma restrição a fim de garantir que as variáveis do problema sejam inteiras. No entanto, existem problemas em que apenas algumas variáveis devem assumir valores inteiros e, nesses casos, são denominados problemas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Os problemas de PLIM são, então, formulados de maneira análoga aos de PL. Porém, para Loesch e Hein (2009), algumas variáveis de decisão assumem valores inteiros e outras assumem valores reais. Barboza (2005), por outro lado, expõe que os problemas de PLIM podem ser de difícil resolução em função da sua natureza combinatória. Para a autora, o número de combinações cresce substancialmente dado o número de variáveis binárias no modelo matemático.

2.5 Estudos semelhantes

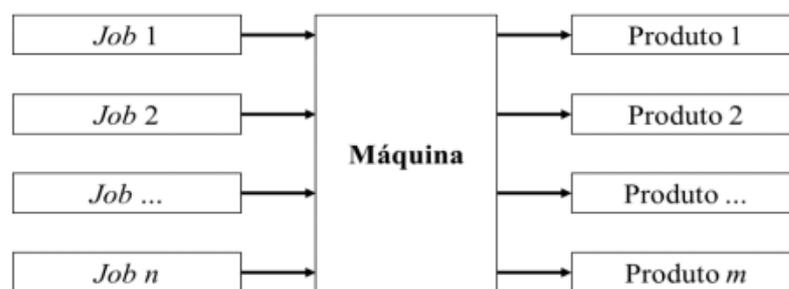
Domingues et al. (2016) argumentam que em função do aumento da concorrência e do desenvolvimento da tecnologia, as empresas devem buscar soluções a fim de reduzir seus custos e entregarem seus produtos ou serviços no menor prazo possível, tendo como foco a sobrevivência e competitividade no mercado. A partir dessa perspectiva, o sequenciamento, que são decisões que definem a ordem de fabricação dos produtos, é fundamental para o atingimento de bons resultados. Logo, o estudo desenvolvido pelos autores teve como objetivo criar um modelo de sequenciamento visando a minimização dos tempos de atraso e adiantamentos dos pedidos, aumentando, assim, a utilização dos recursos.

O sequenciamento de um único recurso para Domingues et al. (2016) é, na maioria das vezes, simples e constitui um problema de programação complexo e, desta forma, é fragmentado em subproblemas. Tavares e Filho (2013) destacam que, do ponto de vista prático, ambientes com apenas um recurso não são comumente encontrados, todavia,

existem contextos específicos em que esse tipo de configuração é aplicado, como, por exemplo, em situações onde há um gargalo ou quando o equipamento utilizado é oneroso.

O sistema abordado por Domingues et al. (2016) é composto por uma máquina única que processa um conjunto n de *jobs* ou tarefas. Cada *job* possui um prazo de entrega e um tempo de processamento. Além disso, a máquina é capaz de executar uma tarefa por vez, que não pode ser interrompida depois de iniciada. Há, também, um tempo de *setup* após cada *job* e não há ociosidade entre as tarefas. Considerando o tempo de processamento e entrega de cada *job* e as características do sistema do tipo *Just In Time*, a finalização da tarefa em um tempo menor que a data de entrega, há penalidade pela antecipação resultante da ocorrência de estoque e seus custos. Por outro lado, se a data de término do *job* for maior que a data de entrega, há uma penalização decorrente do atraso. A Figura 4 apresenta o processo de uma máquina única, abordado pelos autores.

Figura 4 – Processamento de tarefas em uma máquina única



Fonte – Domingues et al. (2016, p. 7)

O modelo sugerido por Domingues et al. (2016) foi baseado em uma variação do sequenciamento *flow shop*, caracterizado por uma mesma sequência de processamento das tarefas em um conjunto de máquinas. O resultado encontrado pelo modelo abordado representa uma redução dos custos em até 20%, se comparado ao sistema praticado pela organização.

Pinto et al. (2019), por outro lado, buscam desenvolver uma programação matemática para o sequenciamento em máquinas paralelas a fim de reduzir o *makespan* e o custo de energia. O *makespan*, segundo os autores, consiste no tempo total de realização de todos os *jobs*. No estudo, Pinto et al. (2019) apresentam um conjunto de *jobs* que serão executados em diferentes máquinas em um período de tempo. Os *jobs* podem ser executados em qualquer uma das máquinas disponíveis. Entretanto, o custo de execução da tarefa varia no decorrer do dia e há, também, tempo de *setup*, que é dependente da ordem das atividades.

Pinto et al. (2019) afirmam que os problemas de sequenciamento visam definir a melhor maneira de se atribuir tarefas aos recursos escassos em um horizonte de tempo. Os autores também destacam que minimizar o *makespan* auxilia na melhor utilização dos recursos. Além disso, Trindade, Araujo e Fampa (2018) desenvolveram um estudo com

intuito de minimizar o *makespan* de uma máquina única, com tempos de processamento diferentes. No caso abordado, foi considerado um conjunto de trabalhos, com tamanho distintos. E, assim, cada trabalho deveria ser atribuído a um lote e, também, atender à capacidade da máquina. A máquina, por sua vez, processa um lote por vez.

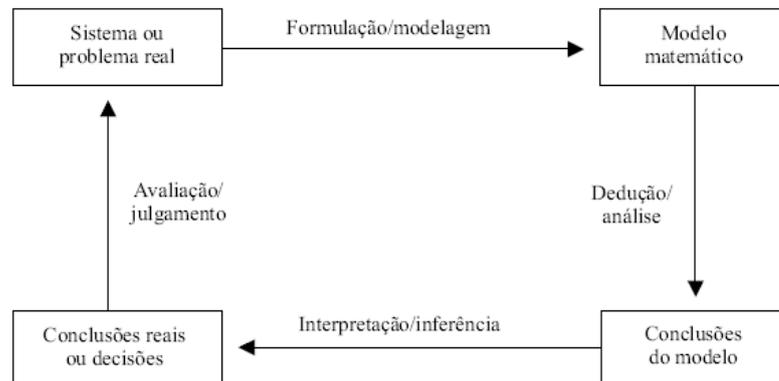
Trindade, Araujo e Fampa (2018) utilizaram a Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para embasar a pesquisa a partir de modelos matemáticos presentes na literatura com o objetivo de reduzir o *makespan* e, assim, realizar comparações computacionais.

3 Metodologia de pesquisa

O presente estudo se caracteriza como pesquisa empírica normativa quantitativa dada à aplicação em um processo real a fim de promover melhorias. Miguel et al. (2012) afirmam que a pesquisa empírica normativa busca estabelecer mecanismos para melhorar a situação vigente. Sendo assim, compreender as características, funcionamento, restrições operacionais, premissas, processos decisórios, variáveis e parâmetros do sistema produtivo é fundamental para formulação do modelo e análise dos resultados.

A realização do trabalho tem como base a formulação proposta na Figura 5, apresentada por Arenales et al. (2015). Assim sendo, dado um sistema real, desenvolveu-se um modelo matemático a fim de analisar os resultados e, posteriormente, obter conclusões reais para tomada de decisão. Neste caso, utilizou-se um modelo de otimização, uma vez que as variáveis do sistema são determinísticas. As variáveis determinísticas são predeterminadas, conhecidas e resultarão em um único resultado.

Figura 5 – Processo de modelagem



Fonte – Arenales et al. (2015, p. 4)

A formulação, ainda segundo Miguel et al. (2012), consiste na determinação das variáveis e relações matemáticas capazes de reproduzir o sistema analisado. De modo geral, o sistema real é reduzido ou simplificado, considerando, assim, as variáveis de interesse e suas relações. O processo de análise, por sua vez, é feito mediante uso de ferramentas computacionais.

3.1 Definição do Problema

Turrioni e Mello (2012) afirmam que, na etapa de conceitualização do problema, há a definição do escopo e das variáveis a serem consideradas no modelo. Posto isso, Hillier e Lieberman (2013) descrevem que é primordial formular um objetivo claro e restrições

adequadas para o modelo estudado. Além disso, na definição do problema, deve-se, também, analisar as relações existentes com os outros processos e áreas, os limites de tempo para obtenção de resposta e tomada de decisão.

Desta maneira, o escopo do problema aqui abordado foi estabelecido a partir de observações regulares na célula de trabalho. Assim sendo, foram definidas as principais variáveis e atividades do sistema. Desta forma, foi feito um esboço dos procedimentos e mecanismos existentes a fim de estabelecer o objetivo do problema e suas restrições.

3.2 Construção do Modelo

Miguel et al. (2012) expõem que, a partir das informações levantadas na definição do problema, formula-se as relações matemáticas a fim de construir um modelo capaz de reproduzir a realidade observada. Concomitantemente, Turrioni e Mello (2012) salientam que, nesta fase, há a definição das relações causais entre as variáveis do sistema.

Para a construção do modelo, realizou-se, então, o levantamento das características fundamentais do processo, como as dimensões das baias; as capacidades de carregamento e os métodos ou regras para alocação e movimentação de material. A função objetivo, para Andrade (2015), busca otimizar as variáveis de decisão que, no caso estudado, foram definidas a partir do deslocamento da ponte rolante, visando a minimização das distâncias percorridas pelo equipamento.

O sistema analisado, de modo geral, é bastante restrito, e as relações matemáticas foram formuladas com a intenção de descrever as limitações inerentes ao processo, como a disponibilidade da ponte rolante; a capacidade de carregamento; o espaço máximo das baias; a ocupação e retirada de material nos diferentes níveis e, por fim, o atendimento à demanda, ou melhor, o abastecimento das bancas de processamento.

Ademais, as relações matemáticas propostas foram embasadas em uma simplificação do problema real, logo, não foram considerados todos os parâmetros e variáveis existentes. Definiu-se as principais variáveis do sistema e as expressões foram assim construídas. O modelo foi elaborado a partir da linguagem matemática AMPL (*A Mathematical Programming Language*).

Nesta fase, as observações e levantamentos dos parâmetros de processo foram feitos por meio de visita *in loco* e acesso aos padrões operacionais, no modelo impresso ou em planilhas eletrônicas editadas no *software* Microsoft Excel 2016. As relações matemáticas foram descritas a partir do modelo conceitual e, assim, foram desenvolvidos dois arquivos, um *.mod*, com o modelo matemático e outro, *.dat*, com a instância criada.

3.3 Solução do Modelo

Miguel et al. (2012) ressaltam que na etapa da solução do modelo utiliza-se softwares e hardwares para execução da formulação construída. Nesta pesquisa, utilizou-se o *software* AMPL para resolução do problema. Por meio do Gurobi, resolvidor disponível na plataforma do AMPL, e a partir de uma máquina com processador Intel® Core™ i3-4005U (1.7 GHz), com 4 de RAM, foi possível extrair os resultados do cenário abordado. A instância considerada neste estudo foi definida a partir da observação do problema real e construída pelo autor da pesquisa.

3.4 Validação do Modelo

A validação, segundo Miguel et al. (2012), consiste em verificar a capacidade e precisão do modelo desenvolvido de representar o sistema real. Turrioni e Mello (2012) ressaltam que, nesta etapa, é feita a verificação das respostas do modelo a fim de constatar se as saídas são coerentes ou não. Desta forma, observou-se as respostas obtidas a partir do modelo implementado e da instância utilizada. As respostas foram geradas em um arquivo de saída no formato *.txt* a partir de um arquivo *.run*, com os comandos de execução e variáveis a serem exibidas.

A validação do modelo foi realizada por meio da análise das variáveis. Assim, verificou-se a ativação das variáveis binárias, as quantidades movimentadas e existentes em cada posição, segundo a disponibilidade do sistema.

3.5 Definição e Análise dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram considerados mediante uma abordagem real do problema. Visto que o sistema possui uma grande quantidade de dados, definir uma instância com todos os tipos de materiais, baias, posições, estoques iniciais, taxas de entrada e períodos de tempos, tornou-se inviável. Desta maneira, a instância utilizada nesta pesquisa é simplificada e busca verificar o comportamento de um cenário simples, com poucos elementos.

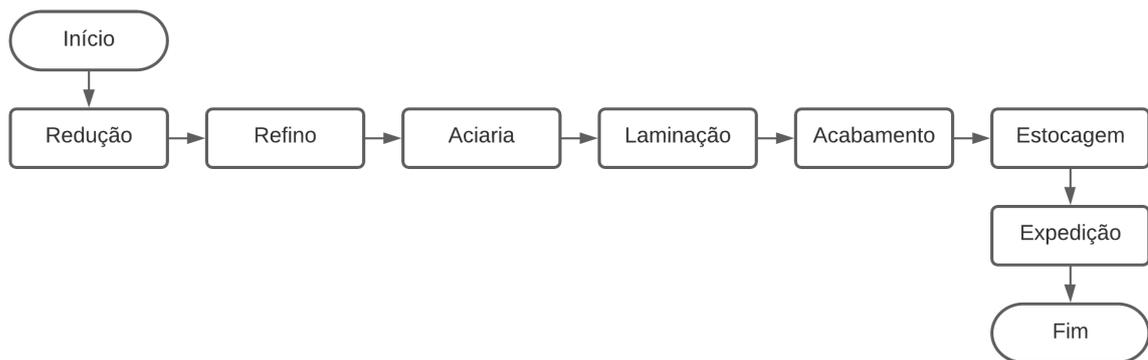
Por isso, os níveis de estoques e taxas de entradas utilizados estão muito baixo da capacidade e do plano mensal de produção da laminação. A análise dos dados, por sua vez, foi realizada a partir dos resultados encontrados pelo resolvidor comercial, onde foi possível determinar as movimentações realizadas pela ponte rolante, a partir das variáveis do modelo.

4 Apresentação do Modelo

4.1 O Problema

Este modelo foi fundamentado em um processo real de movimentação de estoque em uma usina siderúrgica integrada. O processo de produção da empresa estudada é representado, de forma macro, pela Figura 6, onde todos os produtos passam pelo processo de acabamento, porém, cerca de 40% da produção possuem tempo de acabamento igual a 0. O processo da organização vai da redução à expedição do material laminado, sendo assim, são feitos ajustes quanto ao tipo de aço para garantia das propriedades físicas e químicas de cada produto e o atendimento às necessidades do mercado.

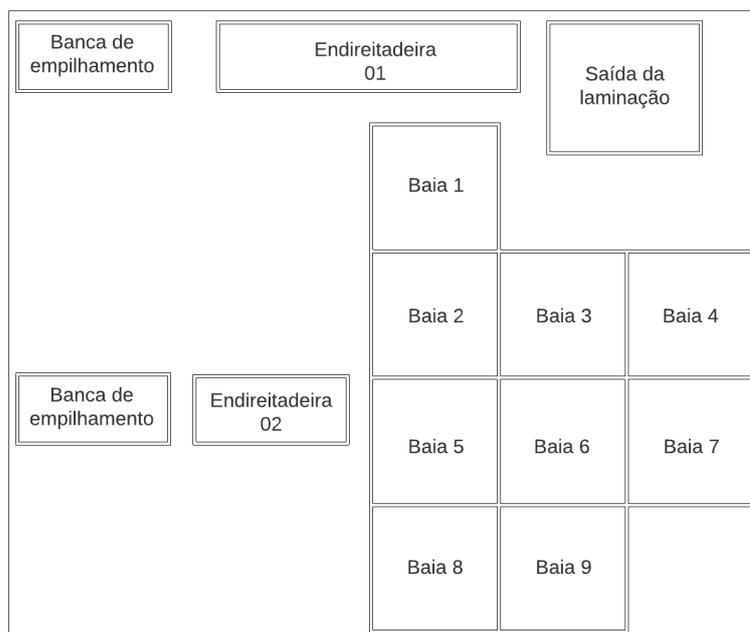
Figura 6 – Processo de produção



Fonte – O autor (2021)

Considerando a existência de um único recurso para realização de movimentações constantes de material intermediário no acabamento, viu-se a necessidade de operacionalizar este artifício de modo a obter ganhos de produtividade. Conforme mostra a Figura 7, o processo de acabamento é constituído por quatro máquinas paralelas (bancas de empilhamento e endireitadeiras) que são abastecidas com os materiais oriundos da laminação. Os materiais são, então, estocados em uma das baias do galpão que possuem medidas congruentes. Entretanto, há situações nas quais o material laminado é levado diretamente para as bancas de processamento.

Figura 7 – Leiaute do acabamento



Fonte – O autor (2021)

Em síntese, a laminação consiste em um processo de conformação mecânica, no qual a seção transversal de um material metálico é modificada por meio da passagem entre dois cilindros. Apesar do bom controle dimensional, alguns produtos laminados carecem de acabamento em função de suas aplicações e características. Deste modo, a empresa estudada busca corrigir e adequar alguns atributos dos materiais a fim de comercializá-los no mercado nacional e internacional.

Produtos como barras e perfis são amplamente utilizados em estruturas metálicas, indústrias mecânicas, torres de transmissão de energia elétrica, serralheria e outros. A qualidade é, então, um fator crucial nas entregas, logo, o processo de acabamento é uma etapa importante na cadeia produtiva. Nesse sentido, a movimentação excessiva dos feixes (conjunto de barras ou perfis) pode comprometer o rendimento metálico dos materiais, visto que há maior probabilidade de ocorrência de empeno e outras avarias.

Dada à chegada constante de material para o acabamento, a ponte rolante deve realizar diversas movimentações a fim de armazenar e abastecer as máquinas de produção com os feixes de materiais. Destarte, o eletroímã, acoplado à ponte rolante, tem um limite de capacidade, segundo o tipo de material, conforme exhibe a Tabela 3. O armazenamento deve respeitar, também, as dimensões de cada baia, sendo um quadrado de 6 metros.

Tabela 3 – Capacidade de carregamento da ponte rolante

Material intermediário	Número de feixes movimentados por vez
Cantoneira (6 metros)	4
Perfil (6 metros)	4
Barra (6 metros)	4

O autor (2021)

A estocagem de material intermediário no galpão do acabamento segue a regra LIFO (*last in, first out*), desta maneira, só é possível acessar os materiais no topo de cada baía. Cada baía possui um número determinado de camadas ou níveis, que pode variar segundo o fluxo de produção da laminação e a disponibilidade de armazenamento no momento da alocação dos materiais.

4.2 O Modelo

O modelo matemático deste estudo consiste em elaborar o sequenciamento de um único equipamento de movimentação de estoque intermediário a fim de reduzir as distâncias percorridas. Deste modo, é considerado o sequenciamento *single-machine*, no qual as operações são dependentes de um único recurso. Uma vez que todas as tarefas são iguais, não é necessário ajuste de máquina, logo, o tempo de *setup* não é considerado.

4.2.1 Conjuntos

Os conjuntos para o modelo desenvolvido estão exibidos na Tabela 4. São, portanto, os tipos de materiais (cantoneiras, barras ou perfis), as baias, posições, posições nas baias e níveis e os períodos de tempos analisados.

Tabela 4 – Conjuntos

Conjunto	Descrição
M	Conjunto de tipos de materiais
B	Conjunto de baias
P	Conjunto de posições
Pb_b	Conjunto de posições nas baias $b \in B$
Pl_p	Conjunto de posições acima de $p \in P$
T	Conjunto de períodos de tempo

O autor (2021)

4.2.2 Parâmetros

Os parâmetros do problema estão apresentados na Tabela 5. Os parâmetros são os elementos conhecidos do problema que, no sistema em questão, refere-se à localização das posições, que deve ser habitual ao operador da ponte rolante, à quantidade de estoque existente em uma determinada posição, ao volume de material que chega da laminação para ser alocado no estoque do acabamento, e a largura do feixe, que é padrão. Outrossim, aspectos como a dimensão de cada baia, volume máximo carregado pelo equipamento e as distâncias entre as posições são predeterminados e cruciais para resolução do problema.

Tabela 5 – Parâmetros

Parâmetro	Descrição
$baia_p$ ($\forall p \in P \cup \{b_0, b_{fim}\}$) <i>symbolic</i> $\in B$	Indica a qual baia $b \in B$ a posição $p \in P$ pertence
$x0_{m,p}$ ($\forall m \in M, \forall p \in P$)	Estoque inicial do material $m \in M$ na posição $p \in P$
$e_{m,t}$ ($\forall m \in M, \forall t \in T$)	Taxa de entrada do material $m \in M$ no tempo $t \in T$
l_m ($\forall m \in M$)	Largura do feixe do material $m \in M$
L_b ($\forall b \in B$)	Dimensão máxima da baia $b \in B$
$q_{m,t}$ ($\forall m \in M, \forall t \in T$)	Demanda do material $m \in M$ no tempo $t \in T$
α	% de ocupação para considerar a posição completa
$Vmax_m$ ($\forall m \in M$)	Volume máximo de material $m \in M$ transportado pela ponte
$D_{p,pl}$ ($\forall p \in P \cup \{b_0\}, \forall pl \in P \cup \{b_{fim}\}$)	Distância entre as posições
b_{fim} <i>symbolic</i>	Baia final do acabamento (banca de abastecimento para processamento)
b_0 <i>symbolic</i>	Baia inicial do acabamento (saída da laminação)

Fonte – O autor (2021)

4.2.3 Variáveis

As variáveis do problema estão apresentadas na Tabela 6. De modo geral, as variáveis do modelo são os itens que se busca medir ou verificar. No caso abordado, definiu-se como variável o indicativo de ocupação da posição com um dado material e de movimentação da ponte rolante, uma vez que este recurso não pode ser alocado se já estiver em utilização. Além disso, estabeleceu-se uma variável para quantidade de material movimentada pelo equipamento e quantidade de feixe na posição em um certo período de tempo.

Tabela 6 – Variáveis

Variável	Descrição
$yfull_{p,t}$	1, se $p \in P$ está integralmente ocupada em $t \in T$; 0, caso contrário
$uy_{p,t}$	1, se as posições acima de $p \in P$ estão ocupadas em $t \in T$; 0, caso contrário
$Z_{m,p,pl,t}$	1, se há movimentação $m \in M$ de $p \in P$ para $pl \in P$ em $t \in T$; 0, caso contrário
$x_{m,p,t}$	Número de feixes de $m \in M$ na posição $p \in P$ em $t \in T$
$V_{m,p,pl,t}$	Volume de $m \in M$ levado de $p \in P$ para $pl \in P$ em $t \in T$

Fonte – O autor (2021)

4.2.4 Função Objetivo

A função objetivo, descrita pela Equação 4.1, consiste em reduzir as distâncias percorridas pela ponte rolante, equipamento de movimentação utilizado para alocação de material no galpão do acabamento. Nesse sentido, multiplica-se a variável binária, que indica a utilização do recurso pelo parâmetro distância. Foram consideradas todas as combinações possíveis de distância entre as posições para a instância referenciada.

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{p \in P \cup \{b_0\}} \sum_{\substack{l \in P \cup \{b_{fim}\} \\ pl \notin P_{b_{aia_p}}}} \sum_{t \in T} D_{p,pl} Z_{m,p,pl,t} \quad (4.1)$$

4.2.5 Restrições

$$e_{m,1} - \sum_{pl \in P \cup \{b_{fim}\}} V_{m,b_0,pl,1} - x_{m,b_0,1} = 0, \quad \forall m \in M \quad (4.2)$$

$$e_{m,t} - \sum_{pl \in P \cup \{b_{fim}\}} V_{m,b_0,pl,t} + x_{m,b_0,t-1} - x_{m,b_0,t} = 0, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \mid t > 1 \quad (4.3)$$

$$x_{0m,p} - \sum_{\substack{l \in P \cup \{b_{fim}\} \\ pl \notin P_{b_{aia_p}}}} V_{m,p,pl,1} - x_{m,p,1} = 0, \quad \forall m \in M, \forall p \in P \quad (4.4)$$

$$\sum_{\substack{l \in P \cup \{b_0\} \\ pl \notin P_{b_{aia_p}}}} V_{m,pl,p,t-1} - \sum_{\substack{l \in P \cup \{b_{fim}\} \\ pl \notin P_{b_{aia_p}}}} V_{m,p,pl,t} + x_{m,p,t-1} - x_{m,p,t} = 0, \quad \forall m \in M, \forall p \in P, \quad (4.5)$$

$$\sum_{m \in M} x_{m,p,t} l_m - L_b \leq 0, \quad \forall b \in B \setminus \{b_{aia_{b_{fim}}}\}, \quad (4.6)$$

$$\forall p \in P_{b_b}, \forall t \in T$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{p \in P \cup \{b_0\}} \sum_{\substack{l \in P \cup \{b_{fim}\} \\ pl \notin P_{b_{aia_p}}}} Z_{m,p,pl,t} \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (4.7)$$

$$V_{m,p,pl,t} - Vmax_m Z_{m,p,pl,t} \leq 0, \quad \forall m \in M, \forall p \in P \cup \{b_0\}, \quad (4.8)$$

$$\forall pl \in (P \cup \{b_{fim}\}) \setminus P_{b_{aia_p}},$$

$$\forall t \in T$$

$$y_{full,p,t} - \frac{\sum_{m \in M} x_{m,p,t} l_m}{\alpha L_b} \leq 0, \quad \forall b \in B \setminus \{b_{aia_{b_0}}, b_{aia_{b_{fim}}}\}, \quad (4.9)$$

$$\forall p \in P_{b_b}, \forall t \in T$$

$$u_{y,p,t} - \frac{\sum_{m \in M, pl \in P_{l_p}} x_{m,pl,t} l_m}{card(P_{l_p} L_b)} \geq 0, \quad \forall b \in B \setminus \{b_{aia_{b_0}}, b_{aia_{b_{fim}}}\}, \quad (4.10)$$

$$\forall p \in P_{b_b}, \forall t \in T$$

$$\sum_{m \in M} x_{m,pl,t} l_m - L_b y_{full_{p,t}} \leq 0, \quad \forall b \in B \setminus \{baia_{b_0}, baia_{b_{fim}}\}, \quad (4.11)$$

$$\sum_{\substack{2 \in P \cup \{b_{fim}\} \\ p2 \notin Pb_{baia_p1}}} V_{m,p1,p2,t} - Vmax_m(1 - uy_{p1,t}) \leq 0, \quad \forall p \in Pb_b, \forall pl \in Pl_p \forall t \in T \quad (4.12)$$

$$\sum_{p \in P \cup \{b_0\}} V_{m,p,\{b_{fim}\},t} - q_{m,t} = 0, \quad \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4.13)$$

$$uy_{p,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.14)$$

$$V_{m,p,pl,t} \geq 0, \quad \forall m \in M, \forall p \in P \cup \{b_0\}, \quad (4.15)$$

$$\forall pl \in P \cup \{b_{fim}\} \mid pl \setminus p, \forall t \in T$$

$$x_{m,p,t} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall m \in M, \forall p \in P \cup \{b_0\}, \forall t \in T \quad (4.16)$$

$$y_{full_{p,t}} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.17)$$

$$z_{m,p,pl,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in M, \forall p \in P \cup \{b_0\}, \quad (4.18)$$

$$\forall pl \in P \cup \{b_{fim}\} \mid pl \setminus p, pl \notin Pb_{baia_p},$$

$$\forall t \in T$$

As restrições 4.2 e 4.3 determinam a quantidade de material em b_0 . As restrições 4.2 são válidas para $t = 1$ e o conjunto 4.3 para $t > 1$. O conjunto de restrições 4.4 e 4.5 indica a quantidade de feixe nas posições das baias de armazenamento. As restrições 4.4 são válidas para $t = 1$, e as 4.5 para $t > 1$. O conjunto de restrições 4.6 garante que a quantidade na posição p não pode exceder a dimensão máxima da baia. As restrições 4.7 garantem que a ponte rolante deve realizar uma movimentação por vez. As restrições 4.8 indicam que o volume movimentado só pode ser positivo se a ponte for alocada. O conjunto de restrições 4.9 indica a ocupação integral da posição no tempo t . As restrições 4.10 indicam a existência de algum volume acima de p . As restrições 4.11 indicam que a posição acima de p , pl , só pode ser ocupada se p estiver ocupada. As restrições 4.12 indicam que só é possível movimentar p se não houver nenhum feixe acima dessa posição. As restrições 4.13 garantem que quantidade movimentada para b_{fim} deve ser igual à demanda. O conjunto de restrições 4.14-4.18 define o domínio das variáveis do modelo.

5 Análise e Resultados

5.1 Instância utilizada

A instância utilizada para o modelo proposto foi baseada em um cenário composto por dois tipos de materiais, mais precisamente, cantoneira e perfil, e foi analisada uma amostra de 10 períodos de tempos. Além disso, foram consideradas 9 posições e 4 baias para armazenamento de material intermediário. Além das baias *b0* e *bfim*, que correspondem a baia da saída da laminação e a baia de abastecimento das máquinas de processamento, denominadas Endireitadeira 01 e 02, respectivamente. A Tabela 7 exibe as distâncias, em metros, de uma posição a outra no galpão da área de produção.

Tabela 7 – Distâncias entre as posições

	p1baia1	p2baia1	p3baia1	p1baia2	p2baia2	p1baia3	p1baia4	p2baia4	p3baia4	bfim
b0	4.0	4.0	4.0	4.5	4.5	4.9	5.3	5.3	5.3	5.5
p1baia1	0	0	0	3.2	3.2	3.5	4.1	4.1	4.1	4.8
p2baia1	0	0	0	3.2	3.2	3.5	4.1	4.1	4.1	4.8
p3baia1	0	0	0	3.2	3.2	3.5	4.1	4.1	4.1	4.8
p1baia2	3.2	3.2	3.2	0	0	3.4	4.4	4.4	4.4	4.6
p2baia2	3.2	3.2	3.2	0	0	3.4	4.4	4.4	4.4	4.6
p1baia3	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	0	4.7	4.7	4.7	5.0
p1baia4	4.1	4.1	4.1	4.4	4.4	4.7	0	0	0	5.2
p2baia4	4.1	4.1	4.1	4.4	4.4	4.7	0	0	0	5.2
p3baia4	4.1	4.1	4.1	4.4	4.4	4.7	0	0	0	5.2

Fonte – O autor (2021)

Não obstante, também foram considerados estoques iniciais em algumas das posições definidas, conforme ilustra a Tabela 8. Os estoques iniciais são, portanto, feixes de cantoneiras e perfis.

Tabela 8 – Estoque inicial nas posições

	p1baia1	p2baia1	p3baia1	p1baia2	p2baia2	p1baia3	p1baia4	p2baia4	p3baia4
cantoneira	4	4	4	3	0	0	0	0	0
perfil	2	2	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

A Tabela 9 apresenta a quantidade de feixes que chega da laminação por período de tempo. A taxa de entrada é definida pelo fluxo de produção da laminação, que pode sofrer interrupções devido às paradas programadas e não programadas na linha produtiva. Os feixes que chegam da laminação são, então, movimentados a fim de serem armazenados até serem processados ou são levados imediatamente para o processo de acabamento mediante necessidade de produção.

Tabela 9 – Entrada de material por período de tempo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cantoneira	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
perfil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

A Tabela 10 expõe a demanda de material por período de tempo. A demanda corresponde a necessidade das máquinas de processamento, ou seja, dado o MPS (*Master Production Scheduling*), é definida a quantidade a ser produzida de cada item ou SKU (*Stock Keeping Unit*).

Tabela 10 – Demanda de material por período de tempo

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cantoneira	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
perfil	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

As dimensões de cada baia estão apontadas na Tabela 11. Conforme citado anteriormente, cada baia corresponde a um quadrado de 6 metros e, desta forma, a alocação deve respeitar tais medidas. As baias denominadas *b0* e *bfim*, por outro lado, não possuem as mesmas medidas.

Tabela 11 – Dimensão de cada baia

b0	9
baia1	6
baia2	6
baia3	6
baia4	6
bfim	3

Fonte – O autor (2021)

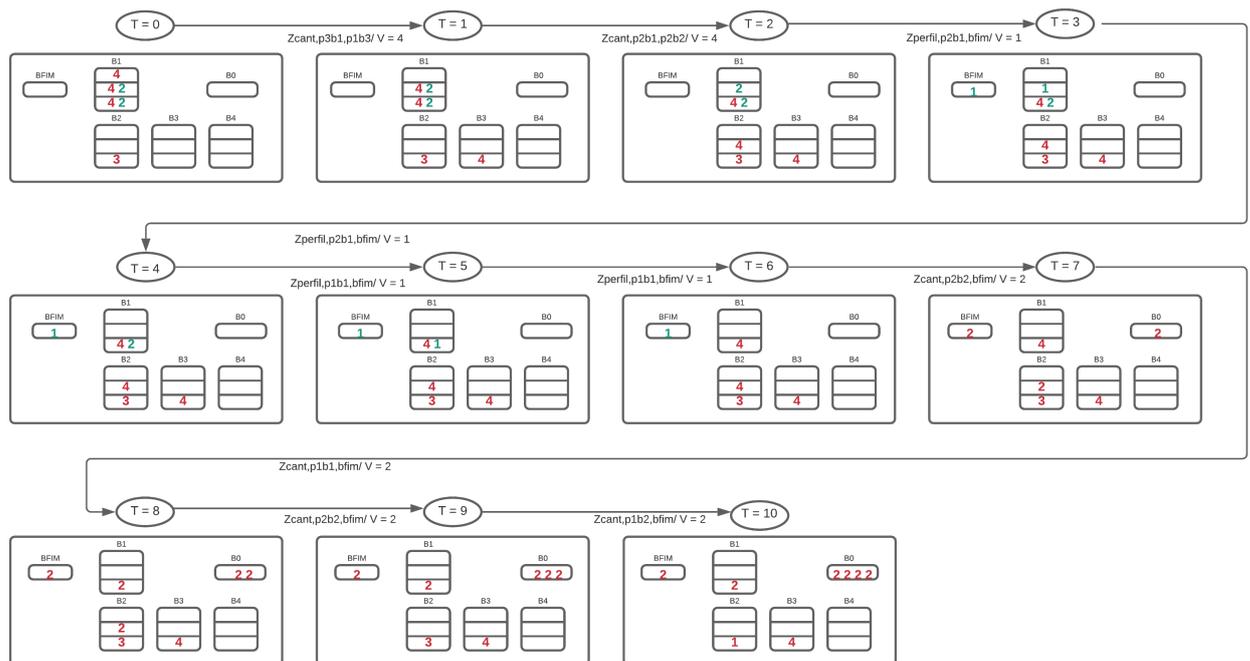
O percentual que indica a ocupação da baia, α , foi definido como 0.95. O l , largura do feixe, por sua vez, foi fixado em 0.875 metros para cantoneira e 0.800 para perfil.

5.2 Resultados Obtidos

Para a instância utilizada, a função objetivo retornou um valor de 44.5 metros, ou seja, considerando as demandas nos períodos elencados e a disponibilidade de material (taxa de entrada e estoques iniciais), a menor distância percorrida pela ponte rolante para atendimento das necessidades é de 44.5 metros. Observa-se que, dada as restrições do

problema, o equipamento pode realizar um movimento por vez, logo, para as situações nas quais há material obstruído, a ponte deve retirar o que está por cima, promovendo, desta forma, a realocação do produto para outra baia ou para banca de abastecimento das máquinas de produção. A Figura 8 exhibe as movimentações realizadas pela ponte rolante, com os respectivos volumes.

Figura 8 – Movimentação da ponte rolante no galpão para a instância utilizada



Fonte – O autor (2021)

Para a versão abordada, apresentada na Figura 8, o tempo total de resolução foi de 0.21875 segundos. Na prática, a movimentação da ponte ocorre em minutos, sendo assim, os dez períodos de tempos representam uma operação da ponte rolante em um intervalo menor que 60 minutos. As movimentações no galpão do acabamento acontecem durante os três turnos de trabalho, mediante necessidade de movimentação e abastecimento das bancas de processamento.

5.2.1 Movimentação da Ponte Rolante

A ativação da variável binária Z indica a movimentação da ponte rolante por período de tempo. Deste modo, percebe-se que no período 8 houve a movimentação de cantoneira da $p1baia1$ para $bfim$. Além disso, nota-se, também, que houve apenas uma movimentação de cantoneira a partir de $p2baia1$, que foi realizada no período 2 para $p2baia2$.

As movimentações de cantoneira realizadas a partir de $p2baia2$ ocorreram nos períodos 7 e 9 para $bfim$. Por outro lado, constata-se que a única movimentação realizada

a partir de $p3baia1$ foi no período 1 para $p1baia3$. A movimentação de perfil, por sua vez, ocorreu nos períodos de 3 a 6, sendo que, no período 3 e 4, as movimentações ocorreram de $p2baia1$ para $bfim$. E, nos períodos 5 e 6, as movimentações foram realizadas a partir de $p1baia1$ para $bfim$ a fim de atender à demanda definida.

5.2.2 Volume por Posição

A partir das saídas do modelo, verificou-se as quantidades de cantoneira e perfil em cada uma das posições por período de tempo. A variável x é inteira e representa, portanto, a quantidade de feixes disponível em cada posição. Observa-se que no tempo 1 havia 4 feixes de cantoneira na $p1baia1$, 3 feixes na $p1baia2$ e 4 na $p2baia1$. Os 4 feixes iniciais da $p3baia1$ foram levados para $p1baia3$, a fim de liberar os feixes de perfil que estavam por baixo que, posteriormente, atenderiam uma demanda de processamento.

No período 2, houve movimentação de 4 feixes de cantoneira da $p2baia1$ para $p2baia2$, logo, a quantidade naquela posição foi igual a 0. Além disso, observa-se também que as entradas em $b0$ não foram movimentadas, pois os estoques iniciais foram suficientes para o atendimento da demanda. As quantidades nas posições consideram, então, os estoques iniciais, as entradas e saídas.

Considerando as quantidades de perfil disponíveis em cada posição por período de tempo, identifica-se que os estoques iniciais de perfil foram suficientes para atender toda demanda do material. Entretanto, se definida uma demanda de perfil no período 1, não seria possível encontrar uma solução viável para o problema, uma vez que a quantidade de perfil disponível estaria obstruída e a ponte é capaz de realizar apenas uma movimentação por vez. Concomitantemente, verifica-se que as quantidades de perfil nas posições foram zeradas em função do atendimento à demanda.

5.2.3 Quantidade de Material Movimentada

Dada à necessidade de atendimento da demanda e configurações dos estoques, deve-se movimentar os materiais de modo a garantir o funcionamento do processo de acabamento. Assim sendo, uma vez ativada a variável binária Z , o modelo deve retornar, também, a quantidade levada de uma posição a outra no galpão. A quantidade levada de cantoneira da $p1baia1$ para $bfim$ no tempo 8 é igual à demanda de 2 feixes naquele período.

Verifica-se que houve movimentação de 2 feixes de cantoneira a partir de $p1baia2$ para $bfim$ no período 10, de modo a atender à necessidade daquele instante. A fim de liberar o volume de perfil tampado que atenderia as demandas dos períodos 5 e 6, houve movimentação de cantoneira de $p2baia1$ para $p2baia2$ no instante 2.

Nos períodos 7 e 9, houve movimentação de $p2baia2$ para $bfim$. As quantidades movimentadas foram designadas ao abastecimento das bancas de processamento, igual a 2

feixes por período de tempo. O número de feixes em tal posição veio, então, da $p2baia1$, no tempo 2, e ficou estocada até o período 7, onde foi levado à $bfim$.

Não obstante, constata-se que o número total de feixes que estava na última posição da $baia1$, na $p3baia1$, foi movimentado para posição 1 da $baia3$. A quantidade movimentada para a $p1baia3$ permaneceu estocada durante todo o intervalo considerado. A $p1baia3$ que, até então estava zerada, foi atualizada para 4.

Nos períodos 3 e 4, observa-se que houve movimentação de perfil a partir de $p2baia1$ para $bfim$. Os volumes transportados atendem à demanda de cada período. Caso houvesse uma antecipação da demanda de perfil do período 3 para o período 1, o problema também retornaria uma solução viável, dado que o número de feixes de cantoneira acima foi movimentado no tempo 1. Neste cenário, houve, então, a movimentação dos estoques acima de p , ou pl para acesso aos volumes de p . Visto que a demanda de perfil foi igual a 1 em todos períodos, o número de feixe movimentado por vez a partir de $p1baia1$ também foi 1 nos períodos 5 e 6. Percebe-se que tal volume estava obstruído nos períodos 1, 2 e 3.

5.2.4 Ocupação da Posição

A ocupação da posição, definida como $yfull_{p,t}$, indica, portanto, a ocupação integral da posição. Uma vez que cada posição deve respeitar à dimensão da baia, a utilização de uma variável nesse sentido busca sinalizar se há ou não espaço para alocação de material. Conforme a construção do modelo, verifica-se que foi definido um parâmetro α a fim de aceitar ou rejeitar a ocupação integral da baia.

A variável $uy_{p,t}$ demonstra se há ou não material acima de p . Essa variável binária foi criada com o intuito de indicar a existência de uma quantidade qualquer acima da posição p . Desta maneira, para as situações onde há uma quantidade acima de p , não é possível acessar a posição p . A cardinalidade expressa, então, a ocorrência de posições acima de p . Logo, o valor da variável uy é atualizado para 1 se o resultado da equação descrita no modelo for maior que 0.

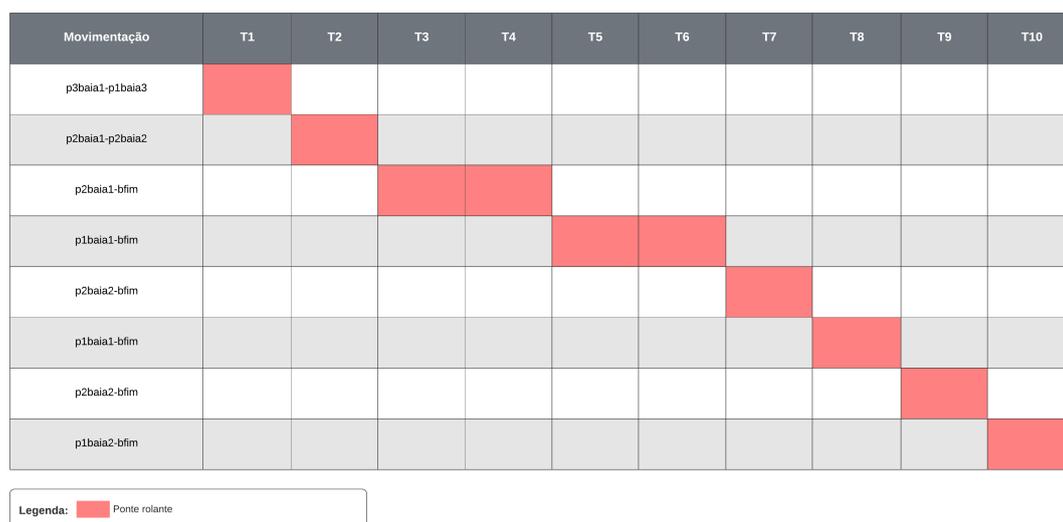
5.2.5 Relação com o OEE

Considerando que o indicador de eficiência OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) trabalha com os índices de desempenho, qualidade e performance, o sequenciamento ótimo de um único recurso pode contribuir para maior eficiência das atividades operacionais. No cenário abordado, observa-se que a movimentação do equipamento se deu em função das menores distâncias e, paralelamente, a garantia do atendimento à demanda. A ponte rolante para carga suspensa, bem como em qualquer outro recurso, tem o propósito de mudar o estado de algum recurso.

Nesse sentido, a partir do sequenciamento definido, é possível evitar movimentações desnecessárias, contribuindo, assim, para o aumento da qualidade. A Figura 9 ilustra o

início e término de cada atividade realizada pela ponte rolante. Dessa forma, é possível verificar o tempo de utilização do recurso, que foi correspondente ao intervalo definido, ou seja, 10 períodos.

Figura 9 – Atividade da ponte rolante



Fonte – O autor (2021)

Além disso, o número de movimentações relaciona-se com o grau de utilização do equipamento. Um baixo grau de utilização indica ociosidade e uma utilização de 100% pode, portanto, se tornar um gargalo, devido ao risco de interrupções. Os equipamentos móveis devem ser capazes de absorver as variações das operações logísticas e produtivas. No caso explanado, o tempo foi definido em períodos, o que inviabilizou o cálculo das disponibilidades. Se convertido em horas ou minutos, é possível determinar a disponibilidade e performance do equipamento.

6 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O presente estudo buscou desenvolver um modelo matemático para o sequenciamento de um recurso de movimentação de estoque, mais precisamente, de um equipamento móvel para cargas suspensas e, assim, teve seu objetivo alcançado. O modelo apresentado atendeu as premissas determinadas na definição conceitual, todavia, nota-se que o problema abordado é bastante restrito, aumentando, desta forma, a complexidade do modelo.

Além disso, este estudo também reforça a importância e o grau de aplicação da Pesquisa Operacional nos sistemas produtivos para tomada de decisão. No que diz respeito aos problemas logísticos e de produção, a sua aplicação pode não ser realmente prática, uma vez que exige a estruturação de bancos de dados, interface com os Sistemas Integrados de Gestão e outros. Assim sendo, carece de uma estrutura robusta e é dependente de diversos fatores tangíveis (*hardwares, softwares* etc.) e intangíveis, como o apoio da equipe.

Para a situação abordada, verificou-se que o modelo proposto é, de fato, aplicável e traz uma solução ótima. Entretanto, o número e o tamanho da instância utilizados ficaram aquém do necessário para conclusões mais profundas. Deste modo, para trabalho futuros, sugere a realização de mais testes, com instâncias maiores e com múltiplos cenários.

Outro aspecto que pode ser desenvolvido, é a relação quantitativa do sequenciamento proposto com o OEE, a partir do desdobramento de cálculos e análises mais detalhadas, a fim de mensurar o impacto da aplicação do modelo de forma prática e condizente com as métricas estipuladas pela organização.

Não obstante, conclui-se que o modelo de sequenciamento aqui apresentado pode ser empregado em diferentes contextos empresariais, como depósitos e outros comércios que seguem a regra LIFO. Além disso, pode também ser expandido para situações nas quais há uma data de atendimento definida, sendo que os materiais com data de expedição mais próxima devem ficar por cima da pilha. Para isso, deve-se ajustar o modelo, resultando, deste modo, no aumento de sua complexidade.

Além da contribuição para o aumento dos índices de desempenho, como disponibilidade e performance, o sequenciamento definido para ponte rolante pode também influenciar na responsividade da cadeia produtiva e no atendimento aos clientes internos e externos da empresa, a partir da velocidade das operações e da redução de movimentações desnecessárias que podem, inclusive, causar danos aos produtos.

Referências

- ANDRADE, E. L. d. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões*. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2015.
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- BARBOZA, A. O. Simulação e técnicas da computação evolucionária aplicadas a problemas de programação linear inteira mista. *Tese de Doutorado*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/74>>.
- CHIAVENATO, I. *Gestão da produção: uma abordagem introdutória*. Barueri, SP: Manole, 2014.
- CHING, H. Y. *Gestão de Estoques na Cadeia de Logística Integrada: Supply Chain*. São Paulo: Atlas, 2010.
- DOMINGUES, M. A. d. S. et al. Otimização do sequenciamento de produção com abordagem *Just-In-Time* e tempos de *setup* dependentes da sequência em uma usina siderúrgica. *XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, João Pessoa, 2016.
- FAVERO, L. P.; BELFIORE, P. *Pesquisa Operacional Para cursos de Engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- FUCHIGAMI, H. Y.; RANGEL, S. Uma análise de estudos de casos em sequenciamento da produção. *XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, Salvador, p. 159–170, 2014.
- GIACOMELLI, G.; PIRES, M. R. S. *Logística e Distribuição*. Porto Alegre: SAGAH, 2016.
- GIANESEI, I. G. N.; BIAZZI, J. L. Gestão estratégica dos estoques. *Revista de Administração da Universidade de São Paulo*, São Paulo, v. 46, n. 3, p. 290–304, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0080210716302060>>.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L.; GOLDBARG, E. F. G. *Programação linear e fluxos em redes*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- LAGE, M. J. *Planejamento e Controle da Produção: teoria e prática*. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- LOESCH, C.; HEIN, N. *Pesquisa Operacional: fundamentos e modelos*. São Paulo: Saraiva, 2009.
- LONGARAY, A. A. *Introdução à pesquisa operacional*. São Paulo: Saraiva, 2013.

- LOZADA, G. *Planejamento e Controle da Produção Avançado*. Porto Alegre: SAGAH, 2017.
- LOZADA, G.; ROCHA, H. M.; PIRES, M. R. S. *Planejamento e Controle da Produção*. Porto Alegre: SAGAH, 2017.
- MESQUITA, M. A. d.; SANTORO, M. C. Análise de modelos e práticas de planejamento e controle da produção na indústria farmacêutica. *Production*, São Paulo, v. 14, p. 64 – 77, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132004000100007&nrm=iso>.
- MIGUEL, P. et al. *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. Rio de Janeiro: Campus. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- PINEDO, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. [S.l.]: Springer, 2008.
- PINTO, J. C. E. M. et al. Uma formulação de programação matemática para minimizar o *makespan* e o custo de energia em um problema de sequenciamento em máquinas paralelas. *LI Simpósio de Pesquisa Operacional*, Limeira-São Paulo, 2019.
- PLATT, A. A. *Logística e Cadeia de Suprimentos*. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2013.
- SANTOS, A. F. d. et al. *Planejamento e Controle da Produção*. Porto Alegre: SAGAH, 2020.
- SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. *Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudo de casos*. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- SLACK, N. et al. *Gerenciamento de Operações e de Processos: princípios e práticas de impacto estratégico*. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- SUZANO, M. A.; GAMBERINI, L. V. F. A utilização do indicador de eficiência OEE (*overall equipment effectiveness*): estudo de caso em uma indústria farmacêutica. *ScientiaTec: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS*, v. 7, n. 2, 2020.
- TAVARES, R. F. N.; FILHO, M. G. Otimização por colônia de formigas para o problema de sequenciamento de tarefas em uma única máquina com terceirização permitida. *Gestão & Produção*, scielo, v. 20, p. 76 – 86, 2013.
- TRINDADE, R. S.; ARAUJO, O. C. B. d.; FAMPA, M. a. An arc-flow formulation for minimizing makespan on a single batch processing machine with non-identical job sizes. *L Simpósio de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, 2018.
- TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção. *Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá*, UNIFEI, Itajubá, 2012.

A Resultados para a Instância Criada

Tabela 12 – Movimentação de cantoneira a partir de $p1baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 13 – Movimentação de cantoneira a partir de $p1baia2$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 14 – Movimentação de cantoneira a partir de $p2baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 15 – Movimentação de cantoneira a partir de $p2baia2$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 16 – Movimentação de cantoneira a partir de $p3baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 17 – Movimentação de perfil a partir de $p1baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 18 – Movimentação de perfil a partir de $p2baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 19 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p1baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 20 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p1baia2$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 21 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de *p2baia1* por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 22 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de *p2baia2* por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 23 – Quantidade movimentada de cantoneira a partir de $p3baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 24 – Quantidade movimentada de perfil a partir de $p1baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 25 – Quantidade movimentada de perfil a partir de $p2baia1$ por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bfim	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
p1baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 26 – Quantidade de cantoneira na posição por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	8
p1baia1	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2
p1baia2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
p1baia3	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	4	4	4	4	2	2	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)

Tabela 27 – Quantidade de perfil na posição por período

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
b0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia1	2	2	2	2	1	0	0	0	0	0
p1baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
p2baia2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p2baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p3baia4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte – O autor (2021)



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Aplicação de um modelo matemático no sequenciamento de um equipamento de movimentação de estoque em uma usina siderúrgica do estado de Minas Gerais” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem o devido referenciamento ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 04 de Fevereiro de 2021.

Tainara Kesse da Silva

Tainara Kesse da Silva