



**FUNDAÇÃO EDSON QUEIROZ
UNIVERSIDADE DE FORTALEZA - UNIFOR
VICE-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO - VRPG
MESTRADO PROFISSIONAL EM ADMINISTRAÇÃO**

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TINGIMENTO: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA TÊXTIL

Uiraquitán Tadeu Gomes

Fortaleza-CE
Setembro, 2021

UIRAQUITAN TADEU GOMES

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TINGIMENTO: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA TÊXTIL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Administração (MPA), da Universidade de Fortaleza (UNIFOR), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Administração.

Área de Concentração: Gestão Empresarial.

Orientador: Prof. Dr. Plácido Rogério Pinheiro.

Coorientador: Prof. Dr. Rommel Dias Saraiva.

Ficha catalográfica da obra elaborada pelo autor através do programa de geração automática da Biblioteca Central da Universidade de Fortaleza

Gomes, Uiraquitan Tadeu.

Otimização da programação de tingimento: um estudo de caso em uma indústria têxtil / Uiraquitan Tadeu Gomes. - 2021
97 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade de Fortaleza. Programa de Mestrado Profissional Em Administração, Fortaleza, 2021.

Orientação: Plácido Rogério Pinheiro.

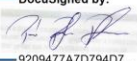
Coorientação: Rommel Dias Saraiva.

1. Indústria têxtil. 2. Tingimento. 3. Denim. 4. Planejamento e controle da produção. 5. Problema do caixeiro viajante. I. Pinheiro, Plácido Rogério. II. Saraiva, Rommel Dias. III. Título.

UIRAQUITAN TADEU GOMES

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE TINGIMENTO: UM ESTUDO DE CASO EM
UMA INDÚSTRIA TÊXTIL

BANCA EXAMINADORA

DocuSigned by:


9209477A7D794D7...

Prof. Dr. Plácido Rogério Pinheiro
Universidade de Fortaleza – UNIFOR

DocuSigned by:


A2DE23E3E513413...

Prof. Dr. Rommel Dias Saraiva
Universidade de Fortaleza – UNIFOR

DocuSigned by:


A16E093A20A249A...

Prof. Dr. João Batista Furlan Duarte
Universidade de Fortaleza – UNIFOR

DocuSigned by:


459B3A9F7973426...

Prof. Dr. Napoleão Vieira Nepomuceno
Universidade de Fortaleza – UNIFOR

DocuSigned by:


16B663E400A847C...

Prof. Dr. Herleson Paiva Pontes
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Aprovada em: **24/09/2021.**

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não poderia chegar a bom porto sem o precioso apoio de várias pessoas.

E primeiro gostaria de agradecer ao meu orientador e coorientador, Professor Doutor Plácido Rogério Pinheiro e Professor Doutor Rommel Dias Saraiva, que sempre acreditaram em mim, agradeço a orientação exemplar pautada por um elevado e rigoroso nível científico, um interesse permanente e fecundo, uma visão crítica e oportuna, um empenho inextinguível e saudavelmente exigente, os quais contribuíram para enriquecer, com grande dedicação, todas as etapas subjacentes ao trabalho realizado.

A minha esposa, Jeanne Gomes, pelo amor, partilha, companheirismo e apoio incondicional, agradeço a enorme compreensão, generosidade e alegria com que me brindou constantemente, contribuindo para chegar ao fim deste percurso.

Ao meu amigo de sempre, Professor Doutor Diego Lomonaco agradeço o apoio, motivação e os preciosos conselhos que ajudou a tornar este trabalho uma realidade.

E claro, ao meu querido filho, Gustavo, que amo incondicionalmente, e espero doravante compensá-lo das horas de atenção que lhe devo.

Ao meu amigo Antonio Kleiber pela parceria e confiança em compartilhar informações cruciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, o meu profundo e sentido agradecimento a todos os professores e a minha turma que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

GOMES, Uiraquitã Tadeu. **Otimização da programação de tingimento**: um estudo de caso em uma indústria têxtil. 2021. 97 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração) – Mestrado Profissional em Administração (MPA), Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2021.

Perfil do autor: Graduação em Engenharia Mecânica pela Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (FEI, 2000).

RESUMO

Em um mercado exigente e globalizado, a gestão da produção tem papel fundamental na competitividade da empresa. A gestão adequada da área produtiva permite que as empresas tenham ganhos de produtividade, reduzindo custos operacionais e permitindo contribuições significativas para a competitividade em frente de seus concorrentes. Em um sistema produtivo, ao serem definidos seus objetivos estratégicos, faz-se necessário formular planos para atingi-los, gerindo os recursos humanos e físicos com base nesses planos. Neste contexto, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) é um grande aliado das organizações. O adequado desenvolvimento das atividades do PCP permite às empresas minimizar atrasos e não atendimentos de ordens de produção, minimizar os estoques de matérias-primas e produtos acabados, minimizar a ociosidade dos recursos humanos pela alocação eficiente de trabalho e minimizar os tempos de processamento de produção. Para isto, o presente trabalho recorre a Programação Linear Inteira (PLI) e propõe um estudo para organizar e desenvolver um modelo que oriente na predição do ganho de tempo de *setup* no processo de tingimento de tecido, estruturado pelo Problema do Caixeiro Viajante. Por meio dos resultados computacionais, foi possível apurar uma economia de 20% a 40% no tempo de execução do sequenciamento para as máquinas de tingimento.

Palavras-chave: Indústria têxtil. Tingimento. Denim. Planejamento e controle da produção. Problema do caixeiro viajante.

GOMES, Uiraquitã Tadeu. **Dye scheduling optimization**: a case study in a textile industry. 2021. 97 p. Dissertation (Professional Master's in Business Administration) – Professional Master's in Business Administration (MPA), University of Fortaleza, Fortaleza, 2021.

Author profile: Degree in Mechanical Engineering from the Educational Foundation Inaciana Padre Sabóia de Medeiros (FEI, 2000).

ABSTRACT

In a demanding and globalized market, production management plays a fundamental role in the company's reference. Proper management of the production area allows companies to obtain productivity gains, reducing operational costs and make contributions to face the competitiveness of their competitors. In a productive system, when defining its strategic objectives, it is necessary to formulate plans to achieve, managing human resources and plans based on requirements. In this context, Planning, Production and Control (PPC) is a great ally of the organizations. The adequate development of the activities of the PPC allows companies to minimize production orders not attended, minimize stocks of raw materials and finished products, minimize idleness of human resources by efficient allocation of work and minimize production processing times. For this purpose, the present work uses Integer Linear Programming and proposes a study to organize and develop a model that guides the prediction of setup time gain in the fabric dyeing process, structured by the Traveling Salesman Problem. Through the computational results it was possible to find a savings of 20% to 40% in the execution time of the sequencing for the dyeing machines.

Keywords: Textile industry. Dyeing. Denim. Planning production and control. Traveling salesman problem.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras	Página
1 Fluxograma da produção de tecidos tipo denim	15
2 Estrutura da pesquisa	18
3 Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e confecção	26
4 Ciclo ou dip.....	28
5 Intensidade da cor em função do número de caixas	28
6 Máquina <i>rope dye</i> (corda).....	30
7 Máquina <i>slasher dye</i> (multicaixas)	32
8 Representação gráfica de uma máquina <i>loop</i>	34
9 Áreas envolvidas no processo de planejamento.....	36
10 Nível hierárquico das atividades	37
11 Visão geral das atividades do Planejamento e Controle da Produção (PCP)	38
12 Utilização da variável de ramificação x_1 para criar A2 e A3.....	46
13 Grafo completo de um ciclo hamiltoniano.....	48
14 Critérios de verificação	56
15 Mensuração do tempo de <i>setup</i> (minuto): máquina de tingimento 7, com 13 <i>Stock Keeping Unit</i> (SKUs).....	64
16 Sequenciamento proposto: máquina de tingimento 7, com 13 <i>Stock Keeping Unit</i> (SKUs)	72
17 Fluxograma de simulação	73
Gráficos	
1 Comércio externo brasileiro de produtos têxteis e confeccionados (milhões de US\$).....	21
2 Região de soluções para A1	44
3 Região de soluções para A2 e A3	44
4 Histograma da frequência de <i>Stock Keeping Unit</i> (SKU): grupo de máquina <i>slasher dye</i> (multicaixas).....	62
5 Histograma da frequência de SKUs: grupo de máquina <i>loop</i>	63
6 Matriz de dispersão % variação x número de SKU; horizonte de planejamento.....	75
7 Matriz de dispersão variação absoluta x número de SKU; horizonte de planejamento.....	75
8 Matriz de dispersão % variação x número de SKU; horizonte de planejamento.....	77

9	Matriz de dispersão variação absoluta x número de SKU; horizonte de planejamento.....	77
10	Regressão linear simples, grupo de máquina multicaixas	79
11	Regressão Linear Simples, grupo de máquina multicaixas	80

Quadros

1	Classificações dos sistemas de produção	39
---	-----------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

	Página
1 20 maiores produtores mundiais de têxteis: 2018.....	22
2 Principais exportadores: 2019.....	23
3 Principais importadores: 2019	24
4 Matriz de tempo de <i>setup</i> (minutos): máquina nº 1, grupo <i>slasher dye</i> (multicaixas).....	60
5 Quantidade de <i>Stock Keeping Unit</i> (SKU) processado.....	61
6 Relação de configurações para máquina x SKU.....	63
7 Tempos de <i>setup</i> grupo de máquina <i>slasher dye</i> (multicaixas)	65
8 Tempos de <i>setup</i> grupo de máquina <i>loop</i>	66
9 Sequência de processamento máquina 7, 13 SKUs	69
10 Matriz principal de tempo de <i>setup</i> (minutos): máquina 7	70
11 Tempos de <i>setup</i> (minutos) máquina 7	71
12 Tempos de <i>setup</i> , otimizado e real.....	72
13 Resultados dos tempos de <i>setup</i> grupo de multicaixas e <i>loop</i> , real e otimizado	73
14 Coeficiente de correlação linear, grupo de máquinas multicaixas.....	74
15 Coeficiente de correlação linear, grupo máquina <i>loop</i>	76
16 Coeficientes grupo de máquina multicaixas	79
17 Coeficientes grupo de máquina <i>loop</i>	79

LISTA DE SIGLAS

ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confeção
Covid-19	Coronavírus
DFJ	Dantzig, Fulkerson e Johnson
ITC	<i>International Trade Center</i>
MTZ	Miller, Tucker e Zemlin
NP	<i>Non-Deterministic Polynomial time</i>
P	<i>Deterministic Polynomial time</i>
PB	Programação Binária
PBM	Programação Binária Mista
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PI	Programação Inteira
PIB	Programação Inteira Binária
PIM	Programação Inteira Mista
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PO	Pesquisa Operacional
PPC	<i>Planning, Production and Control</i>
SKU	<i>Stock Keeping Unit</i>
SSD	<i>Solid State Drives</i>

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Problemática	14
1.3 Objetivo geral	16
1.4 Objetivos específicos	16
1.5 Justificativas	16
1.6 Estruturação da dissertação	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Indústria têxtil	19
2.1.1 <i>O setor</i>	19
2.1.2 <i>Processo de manufatura</i>	25
2.1.2.1 <i>Processo de tingimento</i>	27
2.2 Planejamento e Controle da Produção (PCP)	35
2.2.1 <i>Sequenciamento da produção</i>	38
2.3 Pesquisa Operacional (PO).....	39
2.3.1 <i>Programação Linear (PL).....</i>	40
2.3.2 <i>Programação Inteira (PI)</i>	42
2.3.2.1 <i>Branch-and-bound</i>	42
2.4 Problema do Caixeiro Viajante (PCV)	46
3 METODOLOGIA	50
3.1 Caracterização da pesquisa	50
3.1.1 <i>Natureza da pesquisa</i>	50
3.1.2 <i>Objetivos da pesquisa.....</i>	51
3.1.3 <i>Procedimentos técnicos.....</i>	52
3.2 Fase informativa	53
3.3 Fase de desenvolvimento.....	53
3.4 Fase de aplicação	54
4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DO PROBLEMA.....	57
4.1 Matriz de tempo de <i>setup</i>.....	58
4.2 Estruturação para realização dos testes.....	61

4.3	Modelo de otimização.....	67
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS	68
6	CONCLUSÃO	81
6.1	Limitações do estudo	82
6.2	Sugestões para estudos futuros	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – MATRIZ DE TEMPO DE <i>SETUP</i>	88
	APÊNDICE B – PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO	94

1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, apresentam-se a contextualização, a problematização, a questão de pesquisa, os objetivos geral e específico, as justificativas e a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização

A globalização transpõe as fronteiras e o livre comércio se intensifica entre os países. Com isso, muitos setores da economia que se beneficiavam com as barreiras comerciais que limitavam as cotas de importação e exportação se veem ameaçados pelos concorrentes estrangeiros. Nesse sentido, a ameaça de novos entrantes implica na disputa por *market share*, redução de margens, melhor desempenho, qualidade, custo, produtividade e eficiência operacional. Segundo Porter (2008), esses fatores são fundamentais para as empresas estarem inseridas de forma consistente perante as novas dimensões competitivas.

Em conjunto com a gestão operacional coordenada e integrada, a subsistência de uma organização depende dos seus resultados financeiros e econômicos. Sendo assim, a gestão de recursos que visa reduzir custos não pode comprometer o benefício aos clientes. Esses recursos devem ser administrados de modo eficiente, minimizando desperdícios e custos, e maximizando os lucros (JACKSON; JONES, 1987).

Segundo Carvalho, Silva Filho e Fernandes (1998), para lidar com este aumento da competitividade, foi necessário adequar os sistemas de manufatura a um modelo mais voltado à produção de pequenos lotes e maior sortimento, pois os sistemas de produção de larga escala e poucos produtos não atendiam as necessidades do mercado.

Neste contexto, a área de planejamento tem um papel fundamental na estratégia da empresa, coordenando o fluxo de informações para que os recursos disponíveis sejam direcionados a atender o cliente final, ao menor custo. Para buscar uma eficiente utilização dos recursos, as empresas têm empregado cada vez mais, ferramentas e métodos para apoiar a tomada de decisão (CHIAVENATO, 2017).

No setor têxtil e de vestuário não é diferente, uma vez que este vem sofrendo com a perda de *market share* para os produtos importados e sua baixa eficiência operacional. O setor apresenta uma alta complexidade no processo de planejamento devido ao amplo portfólio de

produtos necessários para atender o dinamismo do mercado da moda. Atender a este mercado exige muita flexibilidade no processo produtivo que muitas vezes pode comprometer sua eficiência operacional, sendo assim a qualidade da elaboração do sequenciamento da produção tem impacto na produtividade, estoques intermediários, qualidade e faturamento.

1.2 Problemática

Segundo Porter (1996), para obter uma melhor *performance* às mesmas atividades dos concorrentes, é necessária eficácia operacional. No entanto, tal eficácia operacional pode não ser suficiente, quando se compete com provedores de outros países, que trabalham sob diferentes condições políticas e econômicas, como: carga tributária, câmbio, leis trabalhistas etc. Neste contexto, as indústrias têm trabalhado cada vez mais na diferenciação de seus produtos, para se contrapor a concorrência.

Sendo assim o setor tem sido desafiado a atender um mercado que demanda cada vez mais por produtos customizados, a custos de produção cada vez menores. Orquestrar tal demanda com recursos escassos tem sido cada vez mais desafiador.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), (2019), o Brasil é o detentor da maior cadeia têxtil integrada do Ocidente, que vai desde a produção das fibras, por meio das plantações de algodão ou fibras sintéticas, passando por todos os processos industriais como fiações, tecelagens, beneficiadoras, confecções, varejo e desfiles de moda.

Muitas indústrias têxteis estão renovando seu parque fabril, adquirindo equipamentos automatizados para alargar as fronteiras de produção e obter melhor qualidade. Neste contexto, atividades de programação e sequenciamento cada vez mais estão explorando as tecnologias e boas práticas da quarta revolução industrial, para melhor aproveitamento dos recursos (ALBIN; GAUDREAULT; QUIMPER, 2020). Até meados da década de 1960, muitos artigos publicados assumiam que o tempo de *setup* (custo) era desprezível. Apesar desta suposição simplificar a análise, comprometia a qualidade da solução de muitas aplicações de sequenciamento, que requeriam tratamento adequado do tempo de *setup* (custo), (ALLAHVERDI *et al.*, 2008).

Os tempos de *setup* são significativos na indústria têxtil e devem ser analisados de forma separada. Os tecidos são produzidos em teares com ajustes específicos, quando estes tecidos são trocados, o tear deve ser ajustado adequadamente, consumindo um tempo que é um recurso escasso (GENDREAU; LAPORTE; GUIMARÃES, 2001).

Dentre os diversos produtos gerados pelo setor têxtil, o estudo volta sua atenção para a produção do tecido tipo denim, que é a base de produção do jeans, sendo o de maior aceitação dentre os produtos têxteis (PAUL, 2015). Seu processo de manufatura é representado pela Figura 1. Passando pelas etapas de fiação, urdissagem, tingimento/engomagem, tecelagem e beneficiamento. Geralmente, o processo de tingimento é o mais crítico na operação, pois consome muito tempo, demanda muito controle e tem grande impacto na emissão de poluentes, exigindo uma programação mais apurada para melhor utilizar os recursos, manter os níveis de qualidade e atender o prazo de entrega do consumidor (ZHANG *et al.*, 2016).



Fonte: Próprio autor (2021).

Com base em levantamento realizado em uma indústria têxtil localizada no estado do Ceará, anualmente é consumido cerca de 740 horas do tempo disponível com *setup*. Dessa forma, o emprego de ferramentas de otimização pode auxiliar na escolha do sequenciamento ideal de tingimento de tecidos, vindo a reduzir o tempo de máquina parada para *setup*.

Diante do contexto apresentado, tem-se a seguinte questão de pesquisa: como melhorar o sequenciamento do processo de tingimento de tecido por meio da otimização dos tempos de *setup*?

1.3 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por meta apresentar um modelo de otimização para o problema de sequenciamento da produção aplicado num caso real de sequenciamento do tingimento de tecido tipo denim, estruturado no Problema do Caixeiro Viajante (PCV), para aprimorar os tempos de *setup*,

O propósito desta pesquisa vai além da comparação entre a medição de tempos de *setup* entre duas formas sequenciamento (empírico x otimizado), e sim obter uma formulação que possa ser replicada em operações de tingimento como um todo.

1.4 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral se desdobram os seguintes objetivos específicos:

- 1) apresentar uma estrutura de avaliação para o processo de tingimento de tecidos, utilizando parâmetros que estejam relacionados à operação;
- 2) coletar a matriz de tempos de *setup* entre pares de *Stock Keeping Unit* (SKU), ou seja, cada produto individual processado;
- 3) propor um modelo de avaliação que possa inferir sobre o impacto do sequenciamento otimizado sobre o sequenciamento empírico;
- 4) comparar os tempos de *setup* entre o modelo empírico e modelo otimizado por meio de Programação Linear Inteira (PLI), e avaliar a correlação do comportamento do tempo de *setup* com os parâmetros definidos.

1.5 Justificativas

O presente trabalho possui como justificativa contribuir com o resultado operacional de uma indústria têxtil localizada na região metropolitana do estado do Ceará, combinando esforços humanos e tecnológicos, para ofertar ao mercado seus produtos e serviços com maior competitividade.

As empresas tem sido cada vez mais desafiadas a identificar medidas necessárias para se manterem competitivas, em um mercado global que está em constante mudança (SEURING; GOLDBACH; KOPLIN, 2004).

No ambiente industrial, há muitas oportunidades de melhoria no que se refere à programação da produção. A complexidade da operação da indústria têxtil requer um estudo aprofundado para melhor aproveitamento dos recursos escassos, sendo o tempo um dos principais (SEURING; GOLDBACH; KOPLIN, 2004).

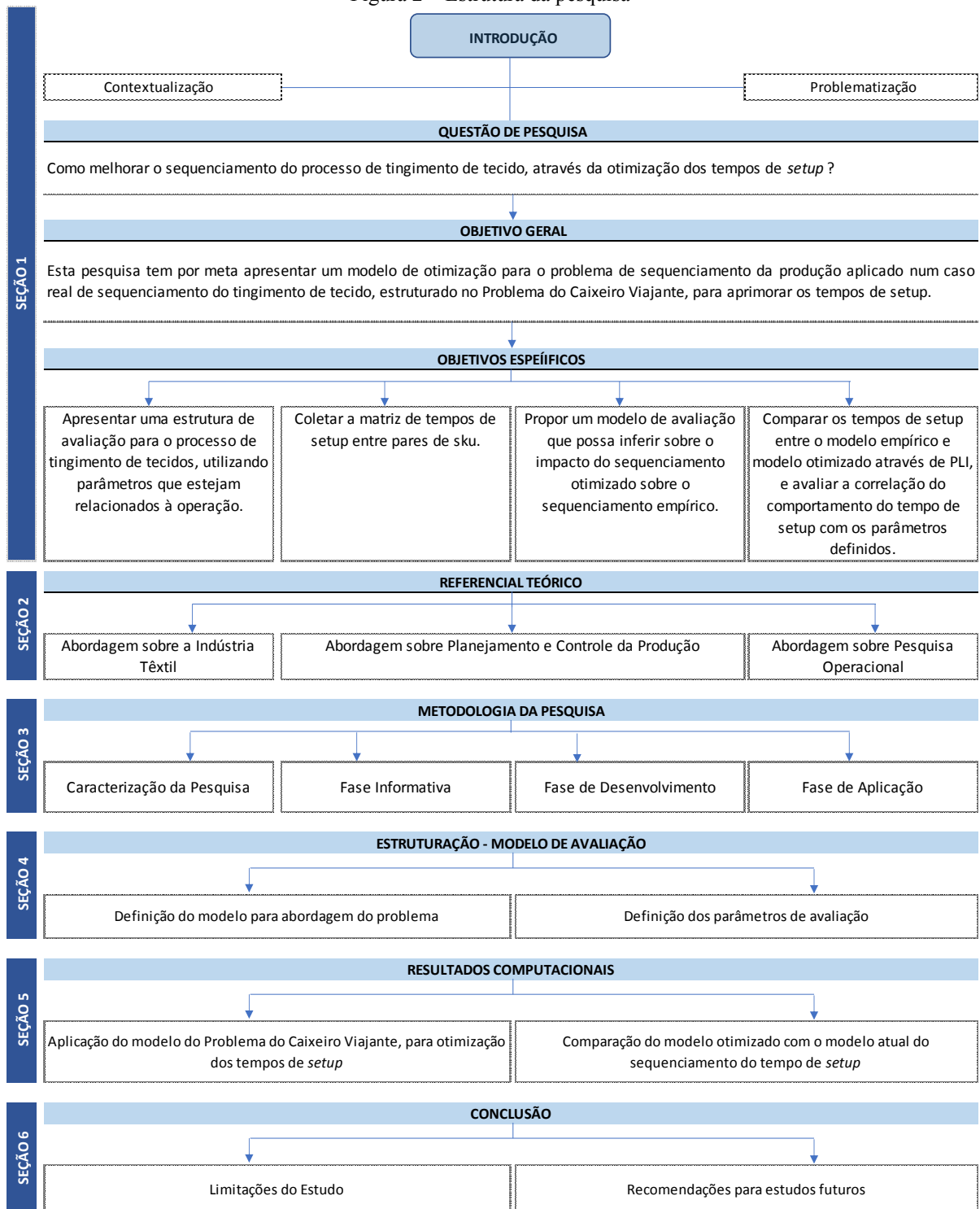
Neste contexto, a aplicação da Pesquisa Operacional (PO) é adequada por se tratar de uma ciência composta por inúmeras técnicas e modelos voltados à otimização de sistemas produtivos, ou seja, propor soluções que indiquem o melhor aproveitamento dos recursos, de modo a produzir mais e melhor a partir de uma dada quantidade de insumos.

1.6 Estruturação da dissertação

A estrutura da dissertação está organizada da seguinte forma:

- a) Seção 1 – é composta pela introdução ressaltando as vantagens e benefícios que tornam elegível um departamento de Planejamento e Controle da Produção dentro de uma organização, assim como os objetivos geral e específicos do estudo e a justificativa;
- b) Seção 2 – tem-se a revisão da literatura, com os principais conceitos, definições e abordagens sobre indústria têxtil e Planejamento e Controle da Produção;
- c) Seção 3 – aborda-se a metodologia de pesquisa com sua caracterização e as fases informativas: de estruturação e de aplicação necessárias para desenvolvimento do estudo;
- d) Seção 4 – traz a estruturação do modelo de avaliação, contendo todas as etapas nas fases de estruturação, avaliação e recomendação;
- e) Seção 5 – traz os resultados e discussão desta aplicação;
- f) Seção 6 – encerra-se com a conclusão.

Figura 2 – Estrutura da pesquisa



Fonte: Próprio autor (2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, aborda-se sobre a Indústria Têxtil, Planejamento e Controle da Produção, com a intenção de gerar maior embasamento relativo à estrutura de avaliação e análise dos resultados da pesquisa.

2.1 Indústria têxtil

A indústria têxtil está voltada a atender uma ampla demanda de produtos para diversas aplicações: para o lar e uso doméstico (roupa de cama e mesa, tapetes, cortinas etc) ou em artigos para aplicações técnicas (produtos geotêxteis, *airbags*, cintos de segurança etc). Esses produtos são obtidos por meio da transformação de fibras em fios, de fios em tecidos e de tecidos em peças de vestuário e artigos têxteis.

2.1.1 O setor

A indústria têxtil iniciou suas atividades no Brasil no século XIX, no entanto de forma tímida, pois a Inglaterra que detinha um bom acordo comercial com Portugal, já havia iniciado a dominação do mercado consumidor brasileiro com uma variedade de produtos. Com isso, seria praticamente impossível que algum mercador ou comerciante local tivesse interesse ou condições de dispor investimentos que pudessem competir com a qualidade e o preço das mercadorias britânicas (FUJITA; JORENTE, 2015).

O incentivo à produção industrial brasileira, aconteceu a partir de 1844, quando houve um reajuste nas taxas de importação, que saltaram de 15% para 30% sobre produtos que não tinham similar no mercado nacional e 60% sobre produto que tinham similar no mercado local, vindo a neutralizar a vantagem competitiva que os produtores estrangeiros tinham, principalmente os ingleses (FUJITA; JORENTE, 2015).

Na primeira década do século XX, o Brasil passou de importador para exportador de algodão, já que a produção de algodão era superior ao consumo interno. Ao longo das décadas seguintes, o setor continuou a crescer, mesmo passando pela Primeira Guerra Mundial e pela crise de 1929 com a quebra da bolsa de Nova York. Durante a Segunda Guerra Mundial, o Brasil se consolidou como o segundo maior produtor têxtil mundial, aumentando suas

exportações em 15 vezes, pois os países em conflito direcionaram todos os recursos para fins militares (FUJITA; JORENTE, 2015).

O ciclo de expansão do setor têxtil no Brasil começou a entrar em declínio na década de 80, devido ao cenário econômico brasileiro e a fragilidade tecnológica. Na década de 90 com a abertura da economia, o setor entrou em crise, pois não estava preparado para competir com os fornecedores internacionais, fruto do protecionismo vivenciado nos anos anteriores. Assim, empresas pequenas e médias, pouco modernizadas, possuíam reduzidas chances de sobreviver enquanto que as grandes, com recursos para modernização, continuaram em operação (KELLER, 2010).

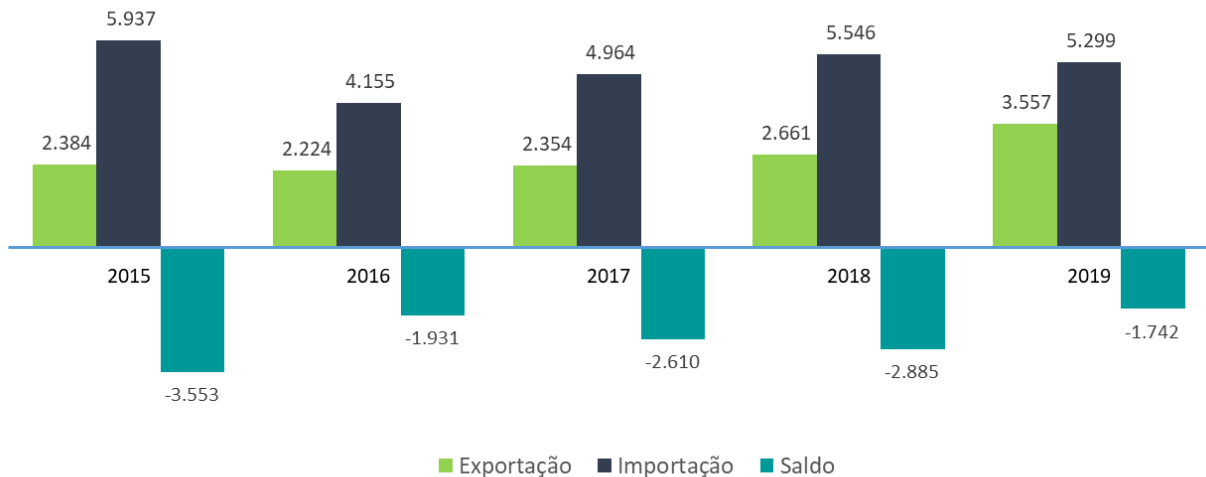
Atualmente, estratégia do setor está focada na diversificação do *mix* de produção, buscando produtos com maior valor agregado por meio do desenvolvimento e design. O emprego de novas tecnologias em produtos deste setor, como as roupas e calçados esportivos, buscam por meio de melhoria de *performance* e o uso da marca como fator de diferenciação e agregação de valor (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2018).

Hoje, o Brasil é referência mundial em design de moda praia, *jeanswear* e *homewear*, tendo crescido também os segmentos de fitness e lingerie. O setor é um dos maiores empregadores do país, respondendo a cerca de 1,5 milhão de empregos diretos, que equivale a 21% do total de trabalhadores alocados na produção industrial no ano de 2019, reforçando a importância do setor para a economia em geral. Neste mesmo ano, a cadeia têxtil produziu aproximadamente R\$186 bilhões, o que equivale a 7% do valor total da produção da indústria brasileira de transformação, aí excluídas as indústrias de extração mineral e a atividade de construção civil (IEMI, 2020).

A produção interna é praticamente direcionada para atender o consumo interno, porém uma parcela relevante do que é consumido internamente é importada. Analisando as importações de toda a cadeia têxtil no período de 2015 a 2019, houve alta de 20,7% em volume, porém queda de 10,7% em valores. No segmento de fibras e filamentos, houve alta de 56,4% em volume e de 29,9% em valores. Já as manufaturas têxteis avançaram 4,5% em volume e recuaram 8,8% em valores, enquanto nos confeccionados ocorreu queda de 3,7% em volume e de 25,2% em valores. O comportamento de confeccionados importados, que caíram em ambos os tipos, deve-se à competição com a produção interna no período, que,

após o movimento de encarecimento de produtos importados, acabou sendo mais vantajosa para a compra (IEMI, 2020).

Gráfico 1 – Comércio externo brasileiro de produtos têxteis e confeccionados (milhões de US\$)



Fonte: Adaptado pelo autor (2021) a partir do IEMI Brasil Têxtil (2020).

Devido ao emprego intenso de mão de obra, as operações deste setor foram deslocadas para países com custos salariais mais baixos, consolidando a expansão em países em desenvolvimento, especialmente os asiáticos. Alguns países da América Central e do Caribe se beneficiando de acordos comerciais para facilitar o acesso a mercados vizinhos se transformaram em fornecedores do mercado estadunidense e União Europeia. Além disso, as empresas globais usufruem de vantagens relacionadas à informalidade dos sistemas produtivos e das relações de trabalho (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2018).

Conforme apurado em 2018, a China foi, de longe, o maior produtor mundial de têxteis, com valor da produção de US\$ 421 bilhões. O 2º maior produtor, a Índia, produziu quase US\$ 67 bilhões, a cerca de 16% do valor da produção da China em 2018. O Brasil foi o 10º maior produtor mundial de têxteis, com valor da produção de US\$ 13 bilhões, conforme mostrado na Tabela 1 (MENDES JUNIOR, 2020).

Tabela 1 – 20 maiores produtores mundiais de têxteis: 2018

Ranking	País	Participação
1	China	421.150
2	Índia	67.244
3	Estados Unidos	53.523
4	Japão	36.521
5	Turquia	32.271
6	Itália	24.822
7	Coreia do Sul	18.166
8	Alemanha	14.346
9	Vietnã	13.295
10	Brasil	12.946
11	Tailândia	9.128
12	Reino Unido	7.279
13	Espanha	6.559
14	França	6.239
15	Africa do Sul	4.617
16	México	4.549
17	Rússia	4.478
18	Portugal	4.402
19	Bélgica	4.279
20	Irã	4.136

Fonte: Elaborada por BNB/ETENE, com dados da UNIDO (2018).

Na lista de principais exportadores, tanto de têxteis quanto de vestuários, dois padrões são visualizados, sendo a China na liderança em ambos os setores e a forte presença de países asiáticos, mesmo com a presença de países desenvolvidos na lista. A China é responsável por 31,7% das exportações mundiais de produtos têxteis e de vestuário. Em seguida aparecem Vietnã, com 5,2%, Bangladesh, com 5,2%, e Itália, com 4,4%, conforme Tabela 2.

O Brasil é um dos grandes produtores e um dos maiores consumidores mundiais de produtos têxteis em geral. Mesmo com essa característica, o comércio internacional ainda é tímido, com o país ocupando 21ª posição entre os maiores exportadores de têxteis e a 79ª entre os maiores exportadores de vestuário, o que nos leva a concluir que, nesse segmento industrial, o Brasil se enquadra claramente no perfil de “produtor-consumidor”, isto é, produz suficientemente para si mesmo, destinando uma pequena fração da produção à exportação (IEMI, 2020).

Tabela 2 – Principais exportadores: 2019

Têxteis		Vestuário		Total		
País	US\$ milhões	País	US\$ milhões	País	US\$ milhões	Partic.
1-China	122.335	1-China	138.238	1-China	260.574	31,7%
2-Estados Unidos	20.913	2-Bangladesh	40.412	2-Vietnã	42.669	5,2%
3-Índia	19.524	3-Vietnã	33.283	3-Bangladesh	42.378	5,2%
4-Alemanha	14.418	4-Alemanha	23.885	4-Alemanha	38.302	4,7%
5-Turquia	12.363	5-Itália	23.771	5-Itália	35.974	4,4%
6-Itália	12.202	6-Índia	16.242	6-Índia	35.766	4,3%
7-Coreia do Sul	10.737	7-Turquia	15.540	7-Turquia	27.903	3,4%
8-Vietnã	9.386	8-Espanha	14.282	8-Estados Unidos	26.118	3,2%
9-Taiwan	8.711	9-Países Baixos	13.043	9-Espanha	19.103	2,3%
10-Paquistão	7.853	10-França	11.987	10-Países Baixos	19.089	2,3%
11-Japão	7.209	11-Hong Kong	11.663	11-Hong Kong	17.993	2,2%
12-Belgica	6.690	12-Bélgica	8.561	12-França	17.314	2,1%
13-Hong Kong	6.330	13-Reino Unido	8.451	13-Bélgica	15.251	1,9%
14-Países Baixo	6.046	14-Camboja	8.287	14-Paquistão	13.696	1,7%
15-França	5.327	15-Indonésia	8.246	15-Indonésia	12.842	1,6%
21-Brasil	3.408	79-Brasil	150	33-Brasil	3.558	0,4%
Subtotal	273.454	Subtotal	376.041	Subtotal	628.533	76,4%
Outros	74.259	Outros	101.104	Outros	194.252	23,6%
Total	347.713	Total	477.145	Total	822.785	100,0%

Fonte: IEMI/*International Trade Center* (ITC), (2020).

Em termos de importações, a concentração dos grandes importadores acaba ocorrendo nos países desenvolvidos, dado o seu maior nível de renda. Países em desenvolvimento figuram no ranking também, mas a maioria dos integrantes são países desenvolvidos.

Observando os números, do total das importações mundiais em 2019, os Estados Unidos responderam sozinhos por 16% dos valores registrados pelo ITC (US\$ 119,8 bilhões) e lideram o ranking mundial dos maiores importadores de produtos manufaturados têxteis e de vestuário. A posição do Brasil nas importações é 25º em têxteis e 36º em vestuário, bem abaixo dos outros países, haja vista a boa oferta interna que o país encontra, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Principais importadores: 2019

Têxteis		Vestuário		Total		
País	US\$ milhões	País	US\$ milhões	País	US\$ milhões	Partic.
1-Estados Unidos	32.241	1-Estados Unidos	87.523	1-Estados Unidos	119.764	16,0%
2-China	24.053	2-Alemanha	38.984	2-Alemanha	53.276	7,1%
3-Vietnã	20.337	3-Japão	27.965	3-Japão	37.132	5,0%
4-Alemanha	14.292	4-Reino Unido	24.905	4-Reino Unido	32.542	4,3%
5-Bangladesh	12.385	5-França	23.907	5-China	32.183	4,3%
6-Itália	9.411	6-Espanha	19.456	6-França	31.159	4,2%
7-Japão	9.166	7-Países Baixos	18.075	7-Itália	26.041	3,5%
9-Indonésia	8.737	8-Itália	16.630	8-Espanha	24.431	3,3%
8-Turquia	8.527	9-Hong Kong	10.462	9-Vietnã	23.630	3,2%
10-Reino Unido	7.637	10-Coreia do Sul	10.399	10-Países Baixos	23.109	3,1%
11-França	7.252	11-Canadá	10.103	11-Hong Kong	16.350	2,2%
12-Índia	6.840	12-Bélgica	9.037	12-Coreia do Sul	16.142	2,2%
13-México	6.733	13-Polônia	8.281	13-Canadá	14.744	2,0%
14-Hong Kong	5.888	14-China	8.131	14-Bélgica	13.119	1,8%
15-Coreia do Sul	5.743	15-Suíça	7.342	15-Polônia	13.075	1,7%
25-Brasil	3.752	36-Brasil	1.657	31-Brasil	5.409	0,7%
Subtotal	182.994	Subtotal	322.859	Subtotal	482.106	64,4%
Outros	130.754	Outros	112.523	Outros	267.024	35,6%
Total	313.749	Total	435.382	Total	749.130	100,0%

Fonte: IEMI/ITC (2020).

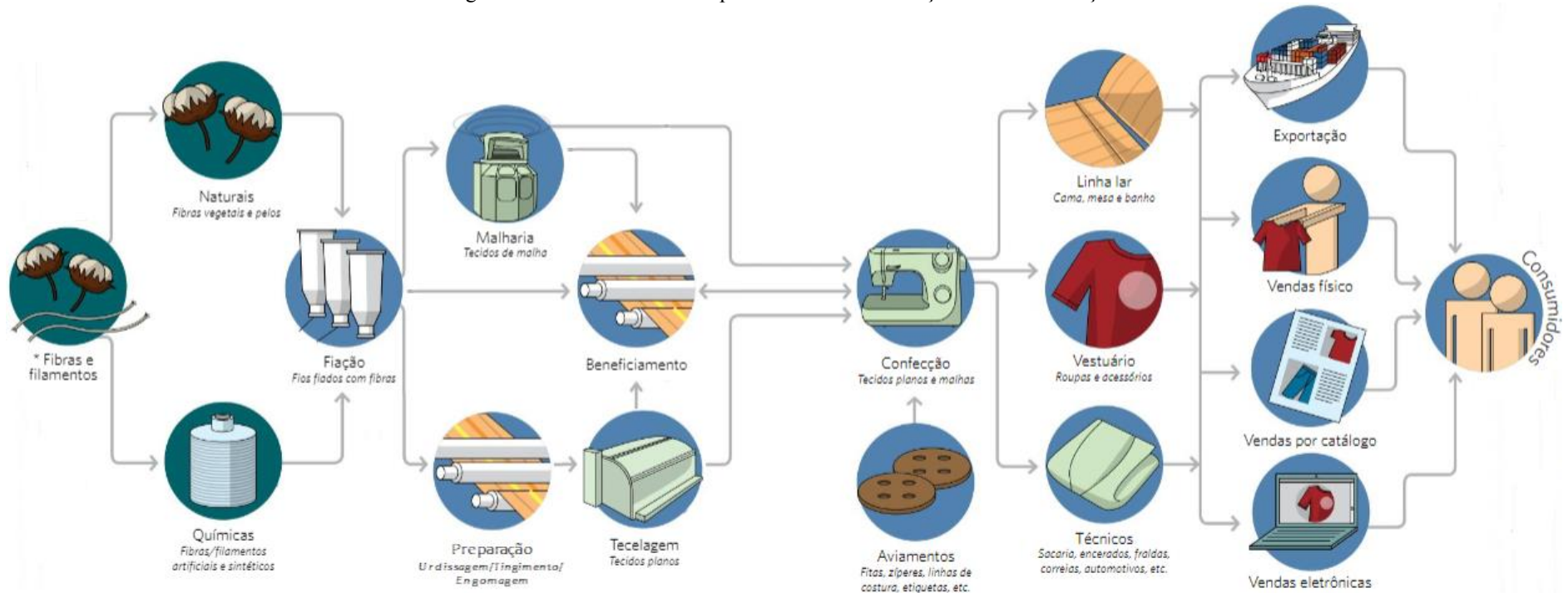
Apesar do Brasil atualmente ser o detentor da maior cadeia integrada do ocidente, os volumes da sua operação não são tão expressivos, principalmente nos volumes de exportação (ABIT, 2018). O setor têxtil no Brasil sofre devido à grande dependência de mão de obra e falta de tecnologia, resultando numa operação que trabalha com baixas margens de rentabilidade, comparado a setores, além disso a competitividade é prejudicada devido às diferentes políticas internacionais praticadas na manufatura. Os gastos com inovação, pesquisa e desenvolvimento das indústrias têxteis, são bastante baixos, mesmo em comparação com os gastos em atividades de inovação da indústria de transformação como um todo (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2018).

As indústrias têxteis, de vestuário e calçados, se caracterizam como absorvedores de tecnologias de fornecedores. Dos fornecedores de equipamentos, os avanços priorizam a incorporação de dispositivos eletrônicos e o aumento da velocidade dos processos de fabricação. A inovação de produto, por sua vez, é realizada tradicionalmente a partir dos avanços das indústrias de insumos, especialmente a química, em que materiais desenvolvidos para outros usos muitas vezes acabam sendo incorporados nos produtos têxteis. Além disso, contam com uma participação importante do design devido à importância da moda para o setor (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2018).

2.1.2 Processo de manufatura

A cadeia têxtil inicia com o processo de transformação da matéria-prima (fibras naturais, sintéticas e polímeros) em fios e filamentos nas fábricas de fiação, em seguida podem ocorrer dois fluxos, primeiro: urdissagem, engomagem/tingimento, tecelagem plana, acabamento, e finalmente a fase de confecção, e segundo: malharia, acabamento, e finalmente a fase de confecção e distribuição, na Figura 3 pode-se ver o macrofluxo da cadeia. Assim, o resultado final de cada etapa constitui o insumo principal da seguinte. Cada uma dessas etapas possui características próprias, existindo descontinuidade entre elas, subdividindo-se em várias operações, havendo a elaboração de produtos intermediários entre elas.

Figura 3 – Estrutura da cadeia produtiva e de distribuição têxtil e confecção



Fonte: Adaptada pelo autor (2021) a partir do Manual Técnico Têxtil e Vestuário (2015).

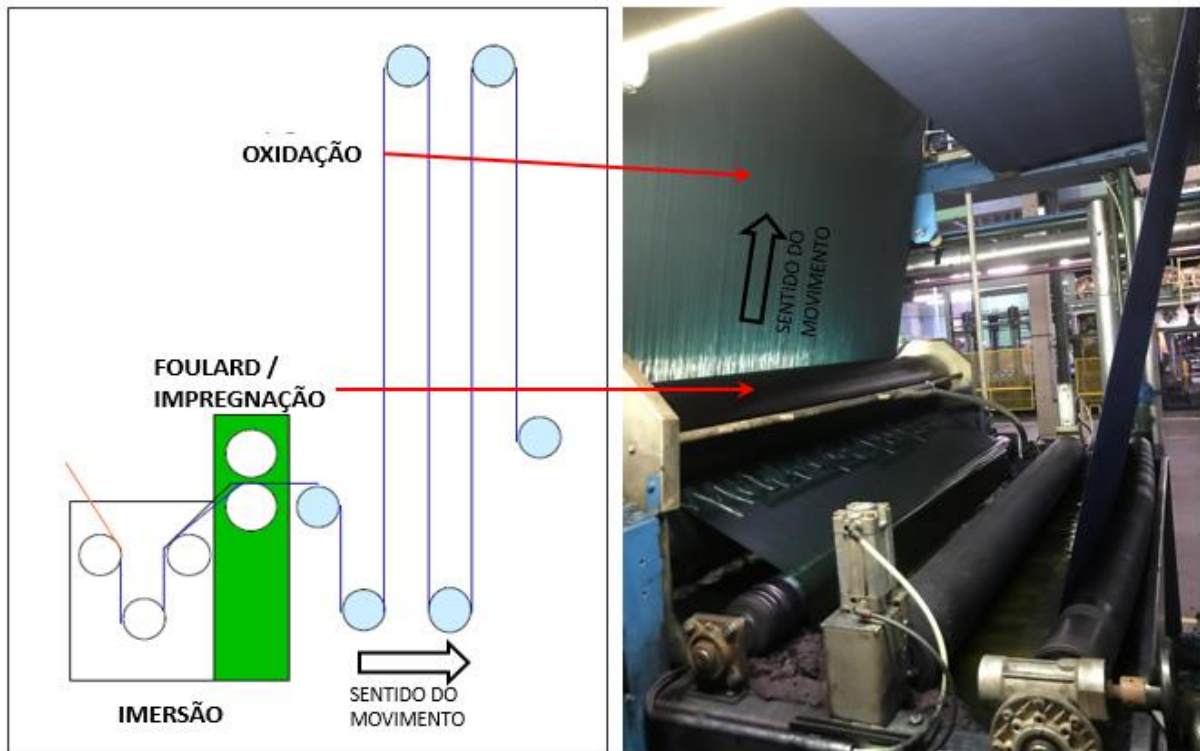
Além do aspecto técnico, há preocupações em minimizar o impacto ambiental negativo da indústria de têxtil. Para isto, muitas empresas têm otimizado o sequenciamento da produção para reduzir as emissões de poluentes (ZHANG *et al.*, 2016). A fabricação de jeans enfrenta um desafio de ecoeficiência no que diz respeito à sustentabilidade. Alternativas têm sido estudadas para desenvolver novos processos de tingimento mais limpos, eficientes, rápidos, baratos e fáceis de aplicar (PAUL, 2015).

2.1.2.1 Processo de tingimento

O processo de tingimento dos tecidos tipo denim (utilizado para confecção do jeans) é caracterizado pelo seu método de tingimento dos fios de algodão ocorrer antes da etapa de tecelagem, sendo que neste processo o corante mais utilizado é o índigo, cujo o método se mantém o mesmo desde a época do índigo natural (LIMA; FERREIRA, 2001).

Este corante tem baixa afinidade com a fibra celulósica devido às suas moléculas serem relativamente pequenas, sendo assim, se faz necessário reduzi-lo numa solução alcalina (leuco). Além disso, também é necessária uma série de etapas, iniciando pela impregnação, depois num dispositivo chamado *foulard*, os fios passam por meio de cilindros compressores, forçando a penetração do banho, em seguida ocorre a oxidação ao ar, para se obter um azul intenso sobre a fibra. Cada série de impregnação, *foulard* e oxidação é denominada ciclo ou dip, conforme Figura 4, em que cada processo de tingimento varia, em geral de 4 a 8 ciclos, (LIMA; FERREIRA, 2001).

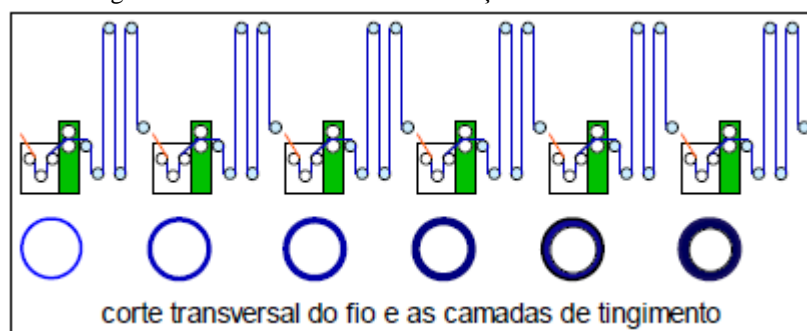
Figura 4 – Ciclo ou dip



Fonte: Lima e Ferreira (2001).

A configuração do número de mergulhos e caixas de tingimento depende da intensidade de cor requerida, sendo que quanto menor o número de caixas menor a intensidade e vice-versa. Outro fator é a resistência da cor do produto sob a ação de diferentes agentes ao qual é exposto durante o processo de manufatura (solidez), sendo que quanto maior o número de caixas maior será a solidez do tingimento, ou seja, quanto maior o número de caixas, menor a concentração de índigo no banho de tingimento e com isso a fixação do corante na fibra será maior, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Intensidade da cor em função do número de caixas



Fonte: Lima e Ferreira (2001).

No processo de tingimento contínuo de índigo existem três tecnologias, que são:

- 1) *rope dye* (corda);
- 2) *slasher dye* (multicaixas);
- 3) *loop dye* (*loop*, também chamadas *girotex*).

***Rope dye* (corda)**

Foi a primeira máquina de tingimento contínuo do mundo, produzida nos Estados Unidos pela *Coocker Machine & Foundry Company*.

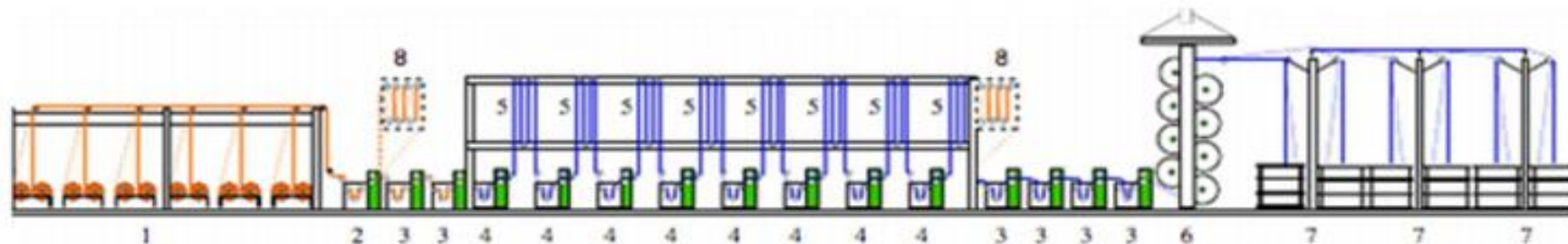
Nesse tipo de máquina, os fios são alimentados paralelamente e após o tingimento destes, são abertos e re-urdidos (dispostos novamente em rolos, que é um processo de preparo à tecelagem) e seguem para a engomagem (LIMA; FERREIRA, 2001).

Principais vantagens:

- a) produtividade alta;
- b) não existem paradas nas trocas de partidas;
- c) excelente uniformidade ourela/meio no tecido final;
- d) pouco desperdício de fio;
- e) altas eficiências de tingimento;
- f) alta solidez.

Principais desvantagens:

- a) alto investimento;
- b) necessidade de espaço físico, geralmente 100% maior do que uma multicaixas;
- c) perda de elasticidade dos fios;
- d) os cabos devem abrir-se após a tintura (*re-beaming*);
- e) custos adicionais pelo uso de amaciante para abertura das cordas;
- f) grande volume do banho de tingimento;
- g) limitação do tipo de fio;
- h) maior mão de obra requerida.

Figura 6 – Máquina *rope dye* (corda)

Fonte: Lima e Ferreira (2001).

***Slasher dye* (multicaixas)**

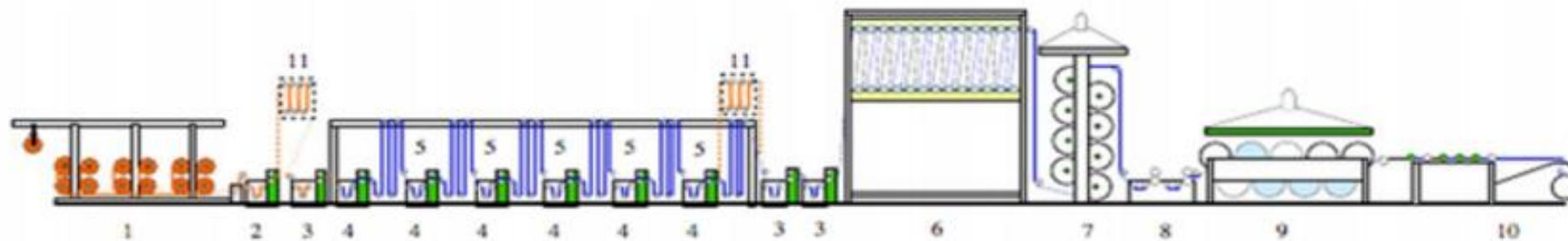
Nesse tipo de equipamento, os rolos de urdume são agrupados em uma gaiola na parte de trás da máquina. Os fios são guiados por cilindros ao longo da máquina e tintos nas diversas caixas de tingimento, em seguida são engomados em uma operação contínua (LIMA; FERREIRA, 2001).

Principais vantagens:

- a) instalação compacta (menor espaço requerido em relação à máquina de cordas);
- b) possibilidade de tingimento de fios finos para camisaria;
- c) produção contínua desde os rolos de urdideira até os rolos da engomadeira;
- d) melhor elasticidade dos fios em relação à máquina de cordas;
- e) baixo volume do banho de tingimento (em relação à máquina de cordas);
- f) flexibilidade na troca de artigos;
- g) adequada para tingimento de denim colorido;
- h) baixo investimento em relação à máquina de cordas;
- i) mão de obra reduzida em relação à máquina de cordas.

Principais desvantagens:

- a) possibilidade de variações centro/ourelas;
- b) perda de produtividade devido às trocas de partidas;
- c) maior tendência à formação de estopa devido às trocas de partidas;
- d) ocorrência de manchas na troca de roladas.

Figura 7 – Máquina *slasher dye* (multicaixas)

Fonte: Lima e Ferreira (2001).

Loop dye (loop, também chamadas girotex)

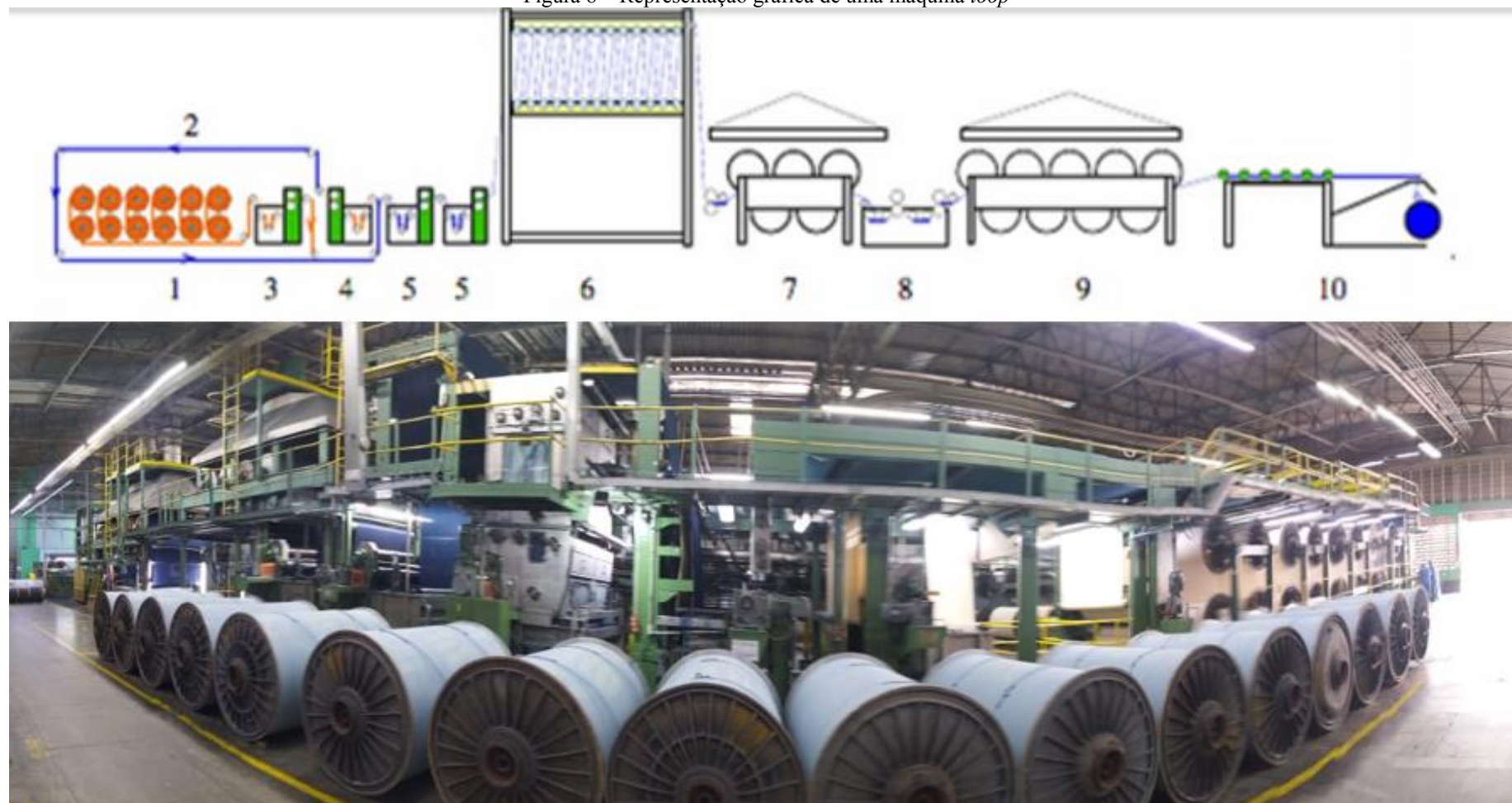
Esse modelo de máquina tem uma única caixa de tingimento, porém a manta de fios urdidos passa mais de uma vez na caixa de tingimento. Este modelo surgiu devido à indisponibilidade de espaço para montar uma máquina tipo multicaixas (LIMA; FERREIRA, 2001).

Principais vantagens:

- a) instalação mais compacta (menor espaço em relação à máquina multicaixas e cordas);
- b) produção contínua desde os rolos de urdideira até os rolos da engomadeira;
- c) melhor elasticidade dos fios em relação à máquina de cordas;
- d) baixo volume do banho de tingimento (em relação a multicaixas e cordas);
- e) flexibilidade na troca de artigos e de títulos finos;
- f) baixo investimento em relação à máquina de cordas e multicaixas.

Principais desvantagens:

- a) possibilidade de variações centro/ourelas;
- b) perda de elasticidade do fio;
- c) perda de produtividade devido às trocas de partidas;
- d) formação de estopa devido às trocas de partidas;
- e) limitação em tonalidades muito escuras;
- f) ruptura mais acentuada;
- g) ocorrência de manchas.

Figura 8 – Representação gráfica de uma máquina *loop*

Fonte: Lima e Ferreira (2001).

2.2 Planejamento e Controle da Produção (PCP)

O problema de *timing* e dimensionamento de lotes de produção é frequente em várias empresas. Essas operações de *setup*, como alternar entre lotes de produção, ajustes de máquina e procedimentos de limpeza em um determinado horizonte de planejamento, são críticas porque o sequenciamento influencia na ocupação do tempo disponível e no custo de fabricação (PAUL, 2015). O sequenciamento estabelece a ordem em que os lotes são executados em um período, levando em consideração os tempos e custos de preparação dependentes da sequência. A integração de dimensionamento de lotes e sequenciamento de lotes permite a criação de melhores planos de produção. Os planos de produção podem minimizar os custos gerais de manutenção de estoque e setups, aproveitando adequadamente os recursos disponíveis em cada período (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

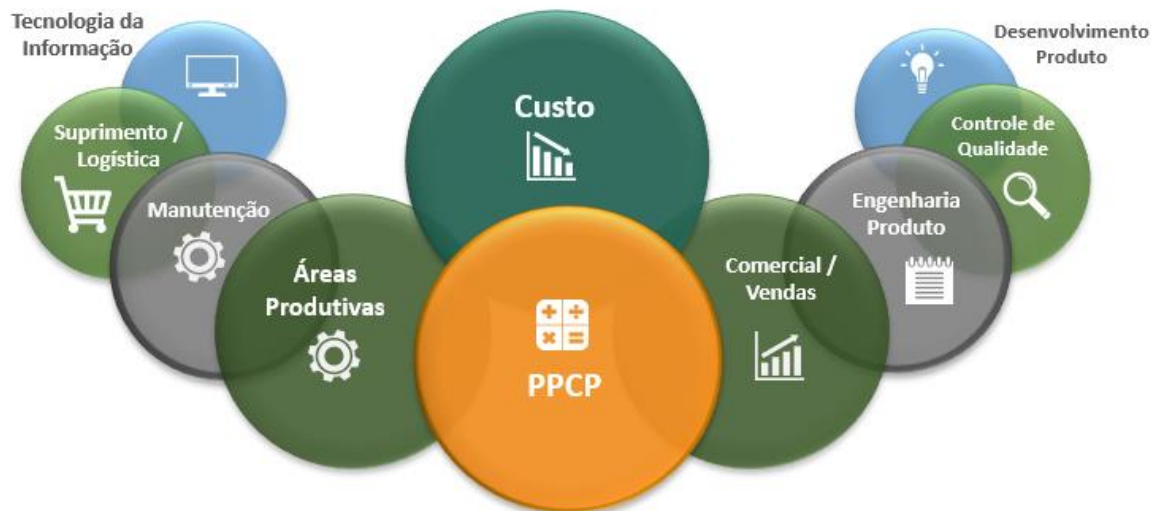
Segundo Zaccarelli (1979), o Planejamento e Controle da Produção (PCP) consolida um conjunto de funções interconectadas cujo o objetivo é comandar e coordenar o processo produtivo de uma organização em parceria com os outros setores da empresa.

Para Chiavenato (2017), o planejamento tem a função de determinar antecipadamente quais são os objetivos a serem alcançados e o que deve ser feito para alcançá-los da melhor forma possível. O planejamento fixa rumos, focaliza o futuro e está voltado para a continuidade e a sustentabilidade da empresa.

Os sistemas de produção têm a finalidade de prover uma gestão mais eficiente de toda a cadeia de suprimentos de uma organização, tendo início no recebimento da matéria-prima até a entrega do produto final, sendo que alguns fatores como compras e a gestão de aquisição de materiais, custos relacionados à produção e à distribuição de produtos não devem deixar de serem observadas (HAX; CANDEA, 1984).

O PCP tem a responsabilidade de coordenar os recursos produtivos de uma empresa de forma a atender as demandas do mercado, conciliando as limitações internas (capacidade de produção e financeira) e auxiliando na tomada de decisão da organização, como políticas de estoque, nível de serviço no atendimento e redução de custos (LUSTOSA *et al.*, 2008).

Figura 9 – Áreas envolvidas no processo de planejamento



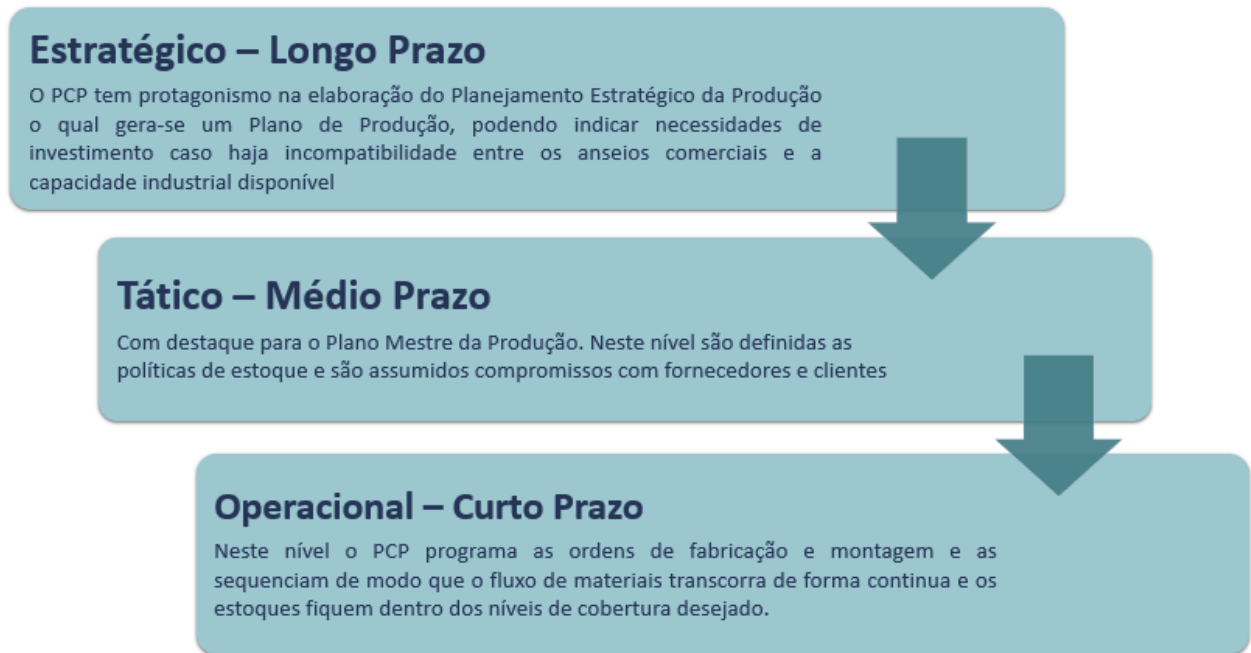
Fonte: Próprio autor (2020).

Segundo Tubino (2000), planejamento é buscar a melhor eficiência na utilização dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos em níveis estratégico, tático e operacional.

O PCP incorpora as demandas do mercado com as limitações internas (capacidade de produção e financeira) e auxilia nas tomadas de decisão da organização, como por exemplo, nas decisões quanto nível de atendimento ao cliente e quanto à redução de custos (LUSTOSA *et al.*, 2008).

Para Tubino (2007), o PCP exerce atividades em três diferentes níveis hierárquicos dos quais cada nível varia de acordo com o horizonte de tempo em estudo, conforme Figura 10.

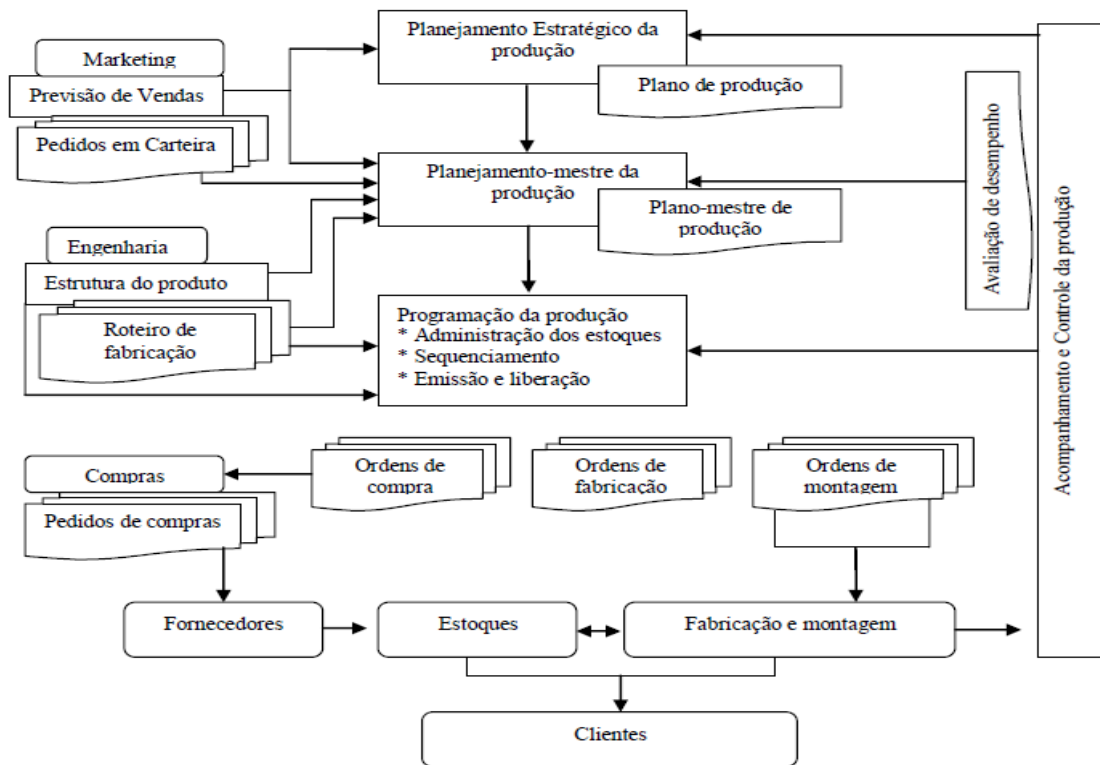
Figura 10 – Nível hierárquico das atividades



Fonte: Próprio autor (2021).

Cabe ao PCP administrar o fluxo de informações por meio de diversas áreas do sistema produtivo, de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional. Cabe ao marketing provê as previsões de vendas de longo e médio prazo, suprimentos informa as entradas e saídas de matérias em estoque, manutenção fornece os planos de manutenção, engenharia de produto informa a lista de matéria da estrutura do produto, engenharia de processo define os tempos padrões de atravessamento, dos recursos humanos são necessários os programas de treinamento, e finanças fornece o plano de investimentos e o fluxo de caixa, conforme Figura 11.

Figura 11 – Visão geral das atividades do Planejamento e Controle da Produção (PCP)



Fonte: Tubino (2007).

2.2.1 Sequenciamento da produção

A partir do plano de mestre de produção de produtos acabados, são organizadas as atividades de curto prazo da programação da produção, sendo que estas atividades estão divididas em três grupos: administração de estoque, sequenciamento e a emissão e liberação de ordens (TUBINO, 2007).

Segundo Tubino (2007), o nível de detalhamento e a intensidade com que são executadas as funções de programação dependem do modelo de operação do sistema produtivo. O Sequenciamento deve conciliar um grande número de restrições de recursos, tempos e relação entre as atividades.

Existem diversos tipos de sistemas produtivos e, segundo Lustosa *et al.* (2008), eles são classificados de modo a facilitar a compreensão de suas características e a relação entre as atividades produtivas, sendo os tipos de classificação mais conhecidos apresentados na Quadro 1.

Quadro 1 – Classificações dos sistemas de produção

TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Grau de padronização dos produtos	Produtos padronizados Produtos sob medida ou personalizados
Tipos de operação	Processos contínuos (larga escala) Processos discretos Repetitivos em massa (larga escala) Repetitivos em lote (flow shop, linha de produção) Por encomenda (job shop, layout funcional) Por projeto (unitária, layout posicional fixo)
Ambiente de produção	Make-to-stock (MTS) Assemble-to-order (ATO) Make-to-order (MTO) Engineer-to-order (ETO)
Fluxo dos processos	Processos em linha Processos em lote Processos por projetos
Natureza dos produtos	Bens Serviços

Fonte: Lustosa *et al.* (2008).

2.3 Pesquisa Operacional (PO)

O crescimento e a complexidade das organizações que surgiram após a revolução industrial levaram a uma divisão do trabalho e à fragmentação das responsabilidades gerenciais. Embora essa fragmentação de tarefas tenha gerado excelentes resultados, acabou comprometendo a visão de funcionamento da organização como um todo, pois cada setor possui objetivos e valores próprios. A organização das operações dessas grandes corporações popularizou novas metodologias. Dentre eles, destaca-se a abordagem científica denominada Pesquisa Operacional (PO), que visa resolver problemas de tomada de decisão por meio de modelos tipicamente matemáticos, sejam eles determinísticos ou probabilísticos (CARVALHO, 2002).

A PO teve início na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), com o objetivo de solucionar problemas de natureza logística, tática e de estratégia militar. Devido à escassez de recursos militares, um grupo de cientistas foi convocado para decidir sobre a utilização mais eficaz dos recursos, caracterizando a primeira atividade formal desse campo de estudo (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

Os resultados positivos, alcançados pelos ingleses, fizeram com que as técnicas da PO fossem amplamente disseminadas no mundo acadêmico e empresarial para resolver problemas de administração (ANDRADE, 2015).

Para Belfiore e Fávero (2012), a PO consiste na utilização de modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais para suporte à tomada de decisão, sendo cada vez mais utilizada em áreas da engenharia de produção, matemática aplicada, ciência da computação e gestão de negócios.

Segundo Andrade (2015), a PO se caracteriza pelo uso de métodos científicos e quantitativos por equipes interdisciplinares, com o objetivo de buscar a melhor utilização de recursos escassos assim como otimizar e coordenar a operação de uma empresa.

A PO consiste na utilização de métodos para apoio a tomada de decisão, a fim de minimizar as incertezas, os riscos e a complexidade inerentes ao processo, com o objetivo de que a escolha da decisão seja eficaz dentre as diversas alternativas disponíveis, sendo assim a qualidade da informação é crucial (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

2.3.1 Programação Linear (PL)

Entre as diversas técnicas de gerência existentes e disponíveis na atualidade, a PL está entre as mais poderosas. Certos ramos de negócio, como as indústrias petrolíferas e de aviação, perceberam o potencial das técnicas englobadas pela PL para a geração de lucros e, sobretudo, para a sobrevivência empresarial em longo prazo (COLIN, 2007).

Segundo Colin (2007), as técnicas de PL possuem uma grande diversidade de locais em que podem ser aplicadas e, o seu uso prático, já gerou grandes economias para os usuários destas técnicas, com algumas destas economias chegando à casa dos bilhões de dólares.

A grosso modo, pode-se definir como PL os problemas de otimização em que a função objetivo e as restrições do problema a ser resolvido por tal modelagem são todas lineares. Portanto, conforme Goldbarg e Luna (2005), os modelos de PL se constituem num tipo especial e específico de modelos de otimização. Para que um determinado sistema ou problema possa ser representado e, conseqüentemente, resolvido pela PL, algumas características devem ser observadas, são elas:

- a) proporcionalidade: a quantidade de recursos a serem consumidos por certa atividade deve ser proporcional ao nível desta atividade na solução final a ser obtida no problema. Ademais, o custo relacionado a cada uma das atividades deve ser proporcional ao nível de operação da atividade;
- b) não negatividade: as atividades devem ser realizadas em níveis não negativos e qualquer proporção de um dado recurso deve poder ser utilizada;
- c) aditividade: o custo total é a soma das parcelas relativas a cada uma das atividades;
- d) separabilidade: quando desejado, deve ser possível a análise apartada do custo, ou o consumo de recursos, específicos das operações de cada uma das atividades envolvidas no problema.

Para Goldberg e Luna (2005), a PL trata de modelos de programação em que as variáveis em estudo são contínuas e apresentam um comportamento dito linear tanto em relação à função objetivo como em relação às restrições envolvidas no estudo.

A PL é um problema de otimização em que a função objetivo é linear nas incógnitas e as restrições consistem em igualdades e desigualdades lineares. A forma exata dessas restrições pode diferir de um problema para outro, no entanto qualquer problema de PL pode ser representado na seguinte forma padrão:

$$\text{minimizar ou maximizar } c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \text{ (função objetivo)} \quad (1)$$

$$\text{sujeito a } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_1 \quad (2)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_2 \quad (3)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_m \quad (4)$$

$$\text{e } x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \text{ (restrição de não negatividade)} \quad (5)$$

em que:

- a) x_j são as variáveis de decisão, principais ou controláveis, $j = 1, 2, \dots, n$;
- b) a_{ij} é a constante ou coeficiente de i -ésima restrição da j -ésima variável, $i = 1, 2, \dots, m$;
- c) $j = 1, 2, \dots, n$;
- d) b_i é o termo independente ou quantidade de recursos disponíveis da i -ésima

restrição, $i = 1, 2, \dots, m$;

e) c_j é a constante ou coeficiente da j -ésima variável da função objetivo, $j = 1, 2, \dots, n$.

Em notação vetorial mais compacta, este problema padrão torna-se:

$$\text{minimizar ou maximizar } c^T x \quad (6)$$

$$\text{sujeito a } Ax = b; x \geq 0 \quad (7)$$

Na equação (6) x é um vetor coluna n -dimensional, c^T é um vetor linha n -dimensional, A é uma matriz $m \times n$ e b é um vetor de coluna m -dimensional. A desigualdade vetorial $x \geq 0$ significa que cada componente de x é não negativo.

2.3.2 Programação Inteira (PI)

Para um problema ser classificado como sendo de PI, todas as variáveis de decisão do modelo devem ser discretas, isto é, podem assumir valores dentro de um conjunto finito ou uma quantidade enumerável de valores, provenientes de uma contagem. Em situações em que parte das variáveis de decisão é discreta e as demais são contínuas, o modelo é chamado de Programação Inteira Mista (PIM), (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

Nos casos em que todas as variáveis de decisão são binárias, isto é, só podem assumir valores 1 ou 0, tem-se um modelo de Programação Binária (PB). E quando parte das variáveis de decisão é binária e as demais são contínuas, tem-se um modelo de Programação Binária Mista (PBM). E quando o modelo tem variáveis de decisão, discretas e binárias, tem-se um problema de Programação Inteira Binária (PIB), (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

Problemas de designação de tarefas são exemplos de PB, pode-se citar: Problema da Mochila, PCV, Problema de Roteirização de Veículos, entre outros. Como exemplo de PI, tem-se o problema de escalonamento de pessoal, e como exemplo de PBM tem-se o problema de localização de facilidades (BELFIORE; FÁVERO, 2012).

2.3.2.1 Branch-and-bound

Existem vários métodos para solucionar problemas de PI, sendo o método de *Branch-and-Bound* um dos métodos mais utilizados. O método consiste numa árvore de busca em que

em cada passo todas as possíveis soluções de uma instância do problema são particionadas em dois ou mais subgrupos, cada representado pela fixação de um nó de uma árvore de decisão (COLIN, 2007).

Genericamente um algoritmo *Branch-and-Bound* funciona a partir da subdivisão do problema original em subproblemas (nós), sendo estes subproblemas, conectados a uma árvore por meio de arcos (*branch*), que representam novas restrições ao modelo. Os nós são gerados dinamicamente durante a execução do algoritmo (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Para maior compreensão do método será utilizado um exemplo numérico para explicar os detalhes (TAHA, 2008).

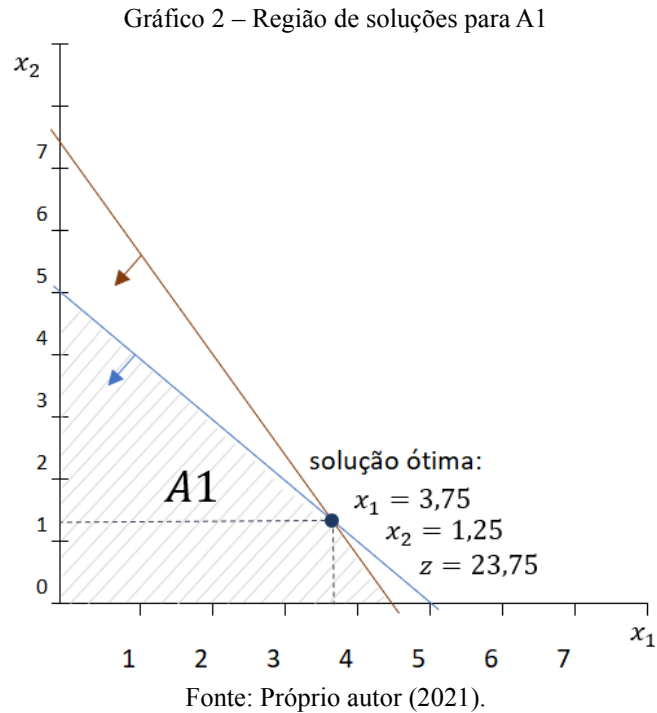
$$\text{maximizar } 5x_1 + 4x_2 \quad (8)$$

$$\text{sujeito a } x_1 + x_2 \leq 5 \quad (9)$$

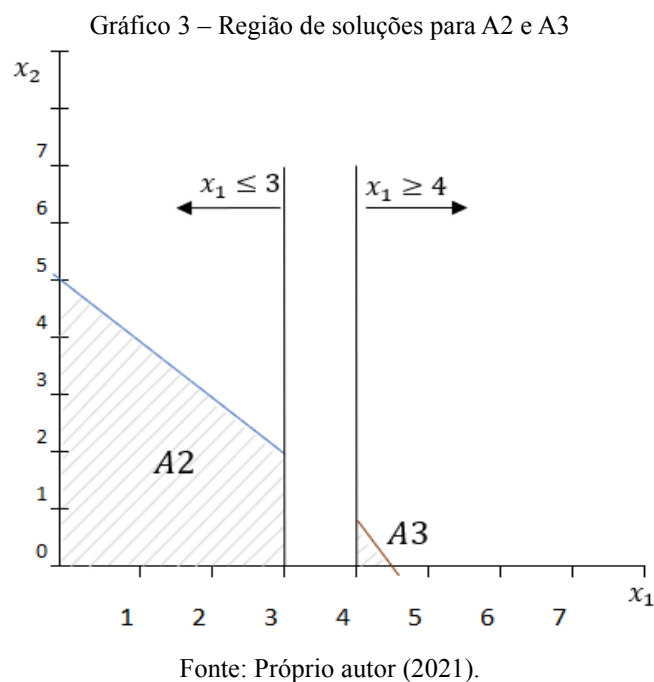
$$10x_1 + 6x_2 \leq 45 \quad (10)$$

$$x_1, x_2 \text{ inteiras, não negativas} \quad (11)$$

Para solução gráfica deste problema, devemos construir um plano cartesiano com eixos x_1 , x_2 , para determinar a região de soluções factíveis que será chamada de A1, representando as restrições do modelo de maximização estudado. Inicialmente, para cada restrição, traça-se a reta que represente a equação de igualdade (sem considerar o sinal do tipo \geq ou \leq) e, a partir daí, determina-se a direção da reta que satisfaça a desigualdade. Assim, para a restrição (9), a reta que representa a equação $x_1 + x_2 = 5$ pode ser traçada a partir de dois pontos. Se $x_1 = 0$, tem-se que $x_2 = 5$. Analogamente, se $x_2 = 0$, tem-se que $x_1 = 5$. O mesmo racional se aplica à restrição (10) a reta que representa a equação de igualdade $10x_1 + 6x_2 = 45$ é traçada a partir de dois pontos, sendo $x_1 = 4,5$ e $x_2 = 7,5$. Para determinar o espaço de soluções ou a direção da reta que satisfaz a desigualdade $x_1 + x_2 \leq 5$, pode-se considerar qualquer ponto fora da reta. Geralmente, utiliza-se o ponto de origem $(x_1, x_2) = (0, 0)$, devido a sua simplicidade. Tomando como exemplo a reta da restrição (9), o ponto de origem satisfaz a primeira desigualdade, pois $0 + 0 \leq 5$, analogamente utiliza-se o mesmo racional para a restrição (10). Desta forma, pode-se identificar a direção da reta que apresenta soluções factíveis, conforme o Gráfico 2.



Como a solução ótima não satisfaz os requisitos inteiros, o algoritmo *Branch and Bound* modifica a região de soluções de maneira que, a certa altura, identifica a solução ótima da PLI. Em primeiro lugar, selecionou-se uma das variáveis inteiras cujo valor ótimo não seja inteiro, por exemplo $x_1 = 3,75$ arbitrariamente, a região $3 < x_1 < 4$ da região de soluções, não contém nenhum valor inteiro de x_1 e, por isso, pode ser eliminada como não promissora. Sendo assim a região A1 será dividida em duas regiões de possíveis soluções, que será chamada de A2 e A3 conforme o Gráfico 3.



Os dois espaços combinados contêm os mesmos pontos inteiros viáveis que A1, o que significa que, do ponto de vista da solução inteira, lidar com A2 e A3 é o mesmo que lidar com A1.

As novas restrições $x_1 \leq 3$ e $x_1 \geq 4$, são mutuamente exclusivas, de modo que A2 e A3 devem ser tratados de forma separada como mostra a Figura 12. Este desmembramento dá origem ao conceito de ramificação (*branch*) no algoritmo *Branch-and-Bound*. Nesse caso, x_1 é denominada variável de ramificação.

O ponto de ótimo se encontra em A2 ou A3, devendo os dois subproblemas ser examinados, a começar por A2, associado com $x_1 \leq 3$.

$$\text{maximizar } 5x_1 + 4x_2 \quad (12)$$

$$\text{sujeito a } x_1 + x_2 \leq 5 \quad (13)$$

$$10x_1 + 6x_2 \leq 45 \quad (14)$$

$$x_1 \leq 3 \quad (15)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (16)$$

A solução para A2 será: $x_1 = 3$, $x_2 = 2$ e $z = 23$.

Para A3 associado com $x_1 \geq 4$, temos:

$$\text{maximizar } 5x_1 + 4x_2 \quad (17)$$

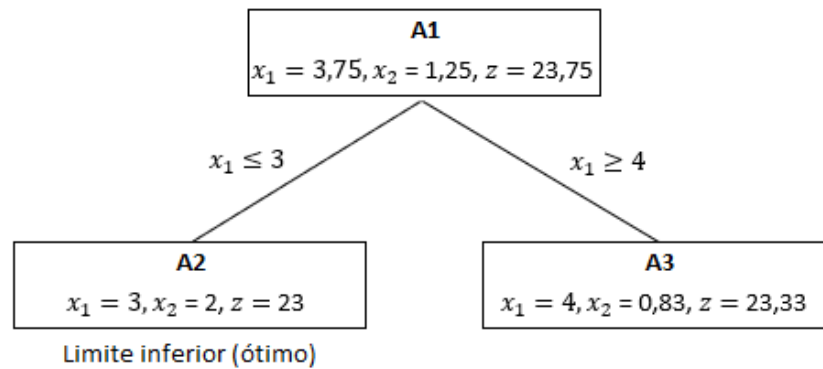
$$\text{sujeito a } x_1 + x_2 \leq 5 \quad (18)$$

$$10x_1 + 6x_2 \leq 45 \quad (19)$$

$$x_1 \geq 4 \quad (20)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (21)$$

A solução para A3 será: $x_1 = 4$, $x_2 = 0,83$ e $z = 23,33$.

Figura 12 – Utilização da variável de ramificação x_1 para criar A2 e A3

Fonte: Próprio autor (2021).

A solução de A2 satisfaz os requisitos inteiros para x_1 e x_2 . Portanto, diz-se que A2 é incumbente, o que significa que não precisa mais ser investigada, pois não pode apresentar nenhuma solução melhor para o problema. Ainda não se pode afirmar que a solução inteira obtida em A2 é ótima para o problema, pois pode haver uma solução melhor para z , com valor inteiro mais alto em A3, porém pode-se afirmar que $z = 23$ é o limite inferior do valor ótimo para a função objetivo. Caso um subproblema não examinado apresente uma solução inteira melhor, o limite inferior é atualizado.

Examinando o subproblema A3, sendo z ótimo = 23,75 na A1, e todos os coeficientes da função objetivo inteiros, é impossível que A3 apresente uma solução inteira melhor que $z = 23$. Sendo assim é descartado a A3. Assim, conclui-se que a solução ótima do problema é associada com o limite inferior, ou seja, $x_1 = 3, x_2 = 2$ e $z = 23$.

2.4 Problema do Caixeiro Viajante (PCV)

Apesar de não haver relatos na literatura que indiquem quem foi o primeiro a usar o nome do PCV, sabe-se que o primeiro estudo divulgado para solução deste problema foi realizado em 1857 pelo matemático Willian Rowan Hamilton. O matemático propôs um jogo baseado no grafo de um dodecaedro, em que cada vértice da figura representava uma cidade da sua região. O objetivo do jogo consistia em: partir de uma cidade, visitar todas as outras uma única vez, retornando à cidade de partida. A solução possível para este tipo de problema ficou conhecida como ciclo hamiltoniano (APPLEGATE *et al.*, 2006).

Um ciclo Hamiltoniano em grafo $G = (V, A)$, onde V é um conjunto de vértices e A um conjunto de arestas ligando estes vértices, consiste em um ciclo simples em que se passa por meio de todos os vértices de G .

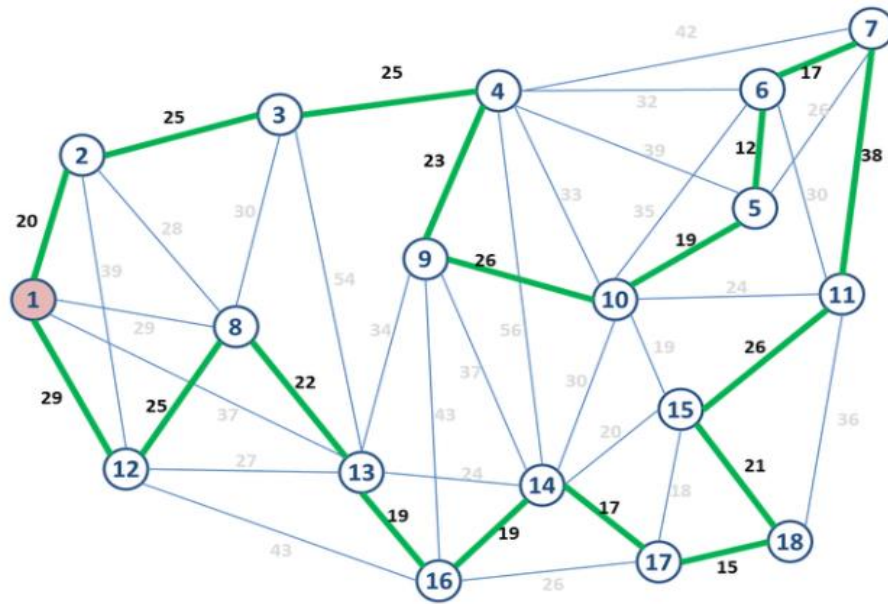
O PCV é um dos problemas mais estudados na área de otimização combinatória (MASUTTI; CASTRO, 2009). O PCV é interessante não só do ponto de vista teórico, mas pelas várias aplicações práticas que podem ser modeladas pelo problema ou suas variações, com a necessidade de encontrar um algoritmo eficiente para resolvê-lo. Entre as aplicações mais valiosas conhecidas do PCV, destacam-se o sequenciamento das operações de máquina na manufatura, a otimização da furação em placas de circuito impresso e a maioria dos problemas de roteamento de veículos (SILVA *et al.*, 2013). Segundo Guimarães *et al.* (2014), pode ser uma fonte essencial de ideias para o desenvolvimento de modelos mais eficientes e problemas de escalonamento. Semelhanças entre o PCV e o problema de sequenciamento permitem a manufatura direta, onde a cidade seria um trabalho, a distância entre uma cidade e outra seria o tempo (custo) de mudança de um trabalho para outro (SOLEM, 1974).

Pode-se descrever o problema da seguinte forma: um caixeiro viajante tem a tarefa de visitar um conjunto de cidades, sendo que a cada par de cidades i e j tem um custo associado, que representa a distância de se deslocar da cidade i à cidade j . O caixeiro deve partir de uma cidade inicial, visitar todas as demais cidades uma única vez e retornar à cidade de partida, completando um Ciclo Hamiltoniano conforme Figura 13, ao menor custo possível, ou pela menor trajetória.

O PCV é interessante não apenas do ponto de vista teórico, mas pelas várias aplicações práticas que podem ser modeladas pelo problema ou com suas variações, havendo a necessidade de se encontrar um algoritmo eficiente para resolvê-lo.

O problema pode ser descrito como um grafo completo que será chamado de G , representado por um conjunto de vértices (nós) que será chamado de V , relacionados por um conjunto de arestas que será chamado de A . Assim, $G = (V, A)$ é um grafo representado pelos conjuntos V e A .

Figura 13 – Grafo completo de um ciclo hamiltoniano



Fonte: Pardini (2015).

Existem diversas formulações para o PCV.

Apresenta-se a formulação de Dantzig, Fulkerson e Johnson (DFJ), (LAGEVIN; SOUMIS; DESROSIERS, 1990).

Parâmetros do modelo:

c_{ij} – custo de deslocamento da cidade i para a cidade j , $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$.

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a cidade } j \text{ é sucede imediatamente a cidade } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (22)$$

Função objetivo de minimização do custo total da rota do caixeiro, em que c_{ij} é o custo ou distância do arco i, j e x_{ij} é a variável binária (0 ou 1) que decide se a rota i, j entrará ou não na solução do problema.

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (24)$$

As restrições (23) e (24) garantem que cada nó ou vértice tenha uma entrada e uma saída para o grafo otimizado. Porém, ainda não garante a inexistência de sub-rotas, ou seja, 2 ou mais grafos desconectados entre si. Para isso, é necessário adicionar um conjunto de restrições para evitar a formação sub-rotas.

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset G \quad (25)$$

A restrição (25) impede que haja formação de sub-rotas, pois considerando S um subconjunto de G em que $|S|$ representa o número de nós dessas sub-rotas. Sendo assim nenhum ciclo será formado a não ser que passe por todos os vértices

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad (26)$$

Quanto a complexidade computacional, o PCV é caracterizado como um problema NP-difícil, o que significa que o problema não pode ser resolvido em tempo polinomial (supondo que $P \neq NP$).

O termo complexidade em geral está associado à demanda de recursos necessários que um algoritmo precisa para resolver um problema computacional. Segundo Cook (1983), uma das medidas mais importante da complexidade computacional é a medida de tempo, pois ao avaliar a eficácia de um algoritmo, deve-se avaliar a capacidade de solução do problema e rapidez como que o problema é resolvido.

Segundo Garey e Johnson (1979), os problemas de otimização combinatória podem ser classificados, segundo sua complexidade, em Deterministic Polynomial time (P), Solid State Drives (NP), NP-difícil e NP-completo. Os problemas pertencentes à classe P são ditos tratáveis computacionalmente, já os demais são considerados intratáveis, ou seja, o número de computações executadas no melhor algoritmo conhecido para o problema cresce exponencialmente em função do tamanho da instância.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, são abordados os aspectos metodológicos necessários à pesquisa para o alcance dos objetivos propostos. A seção está dividida em quatro partes, começando pelas características da pesquisa e em seguida pelas três fases de construção do estudo: Informativa, Desenvolvimento e Aplicação.

Para Yin (2015), o projeto de pesquisa é o documento que consolida as principais ideias de uma pesquisa, tratando quatro problemas principais: quais questões estudar, quais dados são relevantes, quais dados coletar e como analisar os resultados, utilizando diferentes instrumentos para atingir os resultados ideais.

A relevância da metodologia adotada em um trabalho é justificada pela necessidade de embasamento científico adequado, geralmente caracterizado pela busca da melhor abordagem de pesquisa a ser utilizada às questões da pesquisa, bem como seus respectivos métodos e técnicas para seu planejamento e condução (KAUARK; MANHÃES; MEDEIROS, 2010).

3.1 Caracterização da pesquisa

A condução desta dissertação está alinhada com a definição inicial dos tipos de pesquisa, em que são definidos os instrumentos e procedimentos adequados para alcançar o objetivo. Segundo Kauark, Manhães e Medeiros (2010), faz-se necessária a categorização do tipo de pesquisa para a metodologia de estratégias investigativas, existindo várias formas de classificação, dependendo da natureza, da abordagem (assunto), do propósito (objetivo) e dos procedimentos efetivados para alcançar os dados (meio).

3.1.1 Natureza da pesquisa

A natureza da pesquisa pode ser dividida em básica, sendo direcionada a gerar novos conhecimentos para o progresso da ciência, porém sem estar diretamente relacionada a um problema específico, aplicada, direcionada a gerar conhecimento para a solução de problemas específicos. Quanto à abordagem, pode ser:

- a) **Pesquisa Quantitativa:** traduz informações e opiniões em números, por meio de recursos e técnicas estatísticas, de modo a torná-los quantificáveis;
- b) **Pesquisa Qualitativa:** geralmente utilizada quando o interesse do estudo é entender a motivação de determinados comportamentos. Visa o caráter subjetivo do objeto analisado.

Esta dissertação de mestrado é de natureza aplicada, pois objetiva desenvolver um estudo para reduzir o tempo de *setup* em uma indústria têxtil produtora de tecidos, e com abordagem quali-quantitativa, pois se utilizará de recursos e técnicas estatísticas e terá interações com especialistas de processo e pesquisadores para legitimar as informações levantadas e gerar conhecimento prático.

Segundo Lakatos *et al.* (1991), o método quantitativo é um conjunto de procedimentos sistemáticos e racionais que permitem chegar a conhecimentos legítimos e verdadeiros. No campo da Administração, as pesquisas devem contar com uma investigação sistemática, baseadas em critérios sólidos, provendo informações confiáveis para melhor entender as atitudes, os comportamentos e as decisões que cercam as organizações (COOPER, 1984).

3.1.2 *Objetivos da pesquisa*

Segundo Gil (2002), as pesquisas podem ser classificadas em três grandes grupos:

- 1) **Pesquisa Exploratória:** objetiva um maior aprofundamento no problema tornando-o mais explícito. Tem como objetivo aprimorar ideias ou a descoberta de intuições e geralmente envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema e análise de exemplos que estimulem a compreensão;
- 2) **Pesquisa Descritiva:** objetiva descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática;
- 3) **Pesquisa Explicativa:** objetiva esclarecer a ocorrência dos fenômenos, identificando como os fatores determinam ou contribuem para tal. Quando realizada nas ciências naturais requer o uso do método experimental e nas ciências sociais requer o uso do método observacional. Assume, em geral, as formas de Pesquisa Experimental e Pesquisa *Ex post facto*.

Esta pesquisa tem caráter descritivo, pois objetiva descobrir a relação entre variáveis inerente com o problema da pesquisa.

3.1.3 Procedimentos técnicos

Do ponto de vista de procedimentos podem ser:

- a) **Pesquisa Bibliográfica:** elaborada a partir de material já publicado (ex. livros, artigos e periódicos);
- b) **Pesquisa Documental:** elaborada a partir de material que não receberam tratamento analítico;
- c) **Pesquisa Experimental:** determina-se um objeto de estudo, determina as variáveis que podem influenciá-lo, define-se as formas de controle e observação dos efeitos que a variável produz sobre o objeto;
- d) **Levantamento:** quando a pesquisa envolve a interrogação de pessoas, cujo o comportamento se deseja conhecer;
- e) **Estudo de Caso:** envolve o estudo aprofundado de um ou de poucos objetivos, de modo que se permita um conhecimento mais amplo;
- f) **Pesquisa *Ex post Facto*:** quando o estudo é realizado após a ocorrência dos fatos;
- g) **Pesquisa Ação:** associada de forma bastante próxima a ação ou resolução de um problema coletivo e no qual os pesquisadores e representantes da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo;
- h) **Pesquisa Participante:** se desenvolve a partir da interação dos membros da situação investigada e o pesquisador.

Esta pesquisa se caracteriza como estudo de caso em uma indústria têxtil produtora de tecidos, sendo que serão realizadas análises em documentos, coletas de dados, a identificação do processo atual de sequenciamento da programação de tingimento e os impactos da aplicação da otimização de *setup*, quanto a custos e a disponibilidade de tempo.

Em seguida, esses dados foram tratados por um otimizador que propôs um sequenciamento ótimo de tingimento de tecido, cuja função objetivo é reduzir o tempo total de *setup*. Posteriormente, as duas situações (empírica e otimizada) foram comparadas a fim de medir o impacto financeiro e os fatores que se correlacionam para o resultado do problema.

Com relação à coleta de dados, eles foram coletados a partir do banco de dados da empresa, parametrizados no período de 1º/02/2018 a 30/11/2018. Esse período foi escolhido, pois a produção transcorreu de forma uniforme ao longo do ano, diferentemente de 2019 e 2020, quando houve uma forte recessão no setor têxtil seguido da pandemia do Coronavírus (Covid-19), que certamente comprometeria a qualidade dos dados. Assim como os meses de janeiro e dezembro, que são meses de retorno de férias coletivas e desaceleração da produção para o início das férias coletivas.

3.2 Fase informativa

Para Gerhardt e Silveira (2009), o desenvolvimento da pesquisa científica depende da coleta de dados realizada pelo pesquisador, de modo que se tenha um esclarecimento adequado do fenômeno ou fato. As técnicas de coletas de dados ou instrumentos de coleta de dados, conforme os autores, são: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa eletrônica, questionário, formulário, entrevistas, observação e diário de campo/nota de campo.

Esta pesquisa está estruturada em três instrumentos de coleta de dados: pesquisa bibliográfica, pesquisa eletrônica e entrevista. Para Lakatos e Marconi (1996), a pesquisa bibliográfica tem como intenção colocar o pesquisador em contato com tudo que foi produzido sobre o assunto.

Este estudo teve início pela busca do referencial teórico existente sobre o tema em questão, sendo realizada uma revisão sistemática da literatura, selecionados livros, artigos de periódicos, teses de doutorados, dissertações de mestrados, que possuíssem algum grau de impacto com a pesquisa.

3.3 Fase de desenvolvimento

A fase de estruturação iniciou-se com a pesquisa eletrônica, por meio da coleta de dados no sistema de informação da empresa. O relatório utilizado para obtenção dos dados, foi parametrizado para o período de 1º/02/2018 a 30/11/2018. Deste relatório foi possível extrair: a sequência real de tingimento, tipo de SKU processado, a máquina utilizada e data de processamento. Em seguida, foram realizadas entrevistas com os especialistas das áreas de tingimento e PCP, por meio de *brainstorming*, conforme abaixo.

a) Etapa 1 – Entrevista com especialistas de tingimento

Nesta etapa, foram realizadas entrevistas com os especialistas da área de tingimento, a fim de revisar e estruturar a matriz de tempos de *setup*;

b) Etapa 2 – Entrevista com especialistas de PCP e tingimento

Nesta etapa, foi realizado um *brainstorming* entre os membros da equipe do PCP e tingimento, para que fosse definido os fatores que mais poderiam influenciar no tempo de *setup* de tingimento. Após a realização do *brainstorming*, as equipes de PCP e tingimento avaliaram três fatores como os mais relevantes, sendo eles: **grupo de máquina, número de SKU e horizonte de programação**, pois acredita-se que haja uma correlação entre estes fatores e o tempo de *setup*.

Desmembramento dos fatores:

- a) foram criados dois grupos de máquinas, sendo multicaixas e *loop*, sendo cada grupo composto por três máquinas;
- b) para cada máquina serão avaliadas situações com número de SKUs diferentes, em momentos diferentes;
- c) para cada combinação acima, serão simulados diferentes horizontes de planejamento.

Com base no sequenciamento real dos SKUs (realizado empiricamente), obtido por meio do relatório de produção, foi considerado o tempo de *setup* padrão, obtendo assim o tempo teórico despendido com *setup*, que servirá de referência para avaliar o modelo proposto.

3.4 Fase de aplicação

Para o estudo do sequenciamento do tempo de *setup*, escolheu-se a metodologia do PCV, pois foi visto a oportunidade de empregar um problema clássico, que consiste na procura de um circuito que possua a menor distância, passando por n cidades, começando por uma cidade qualquer, visitando todas as outras uma única vez e retornando à cidade de origem. No estudo em questão, os SKUs representarão as cidades e o tempo de *setup* entre pares de SKUs, representarão a distância entre cidades.

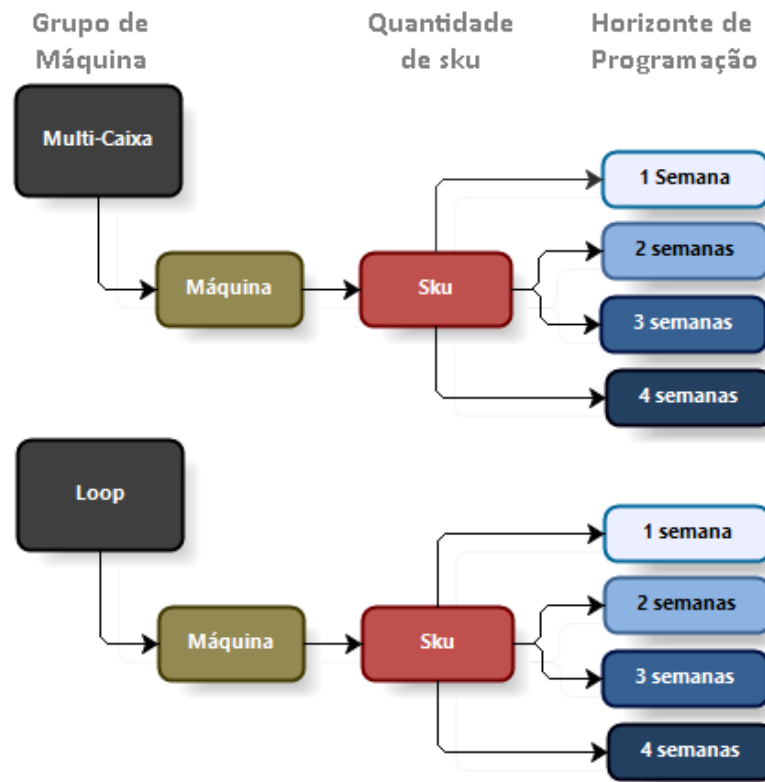
O recurso utilizado para simulação foi o *software* Lingo, versão 17 licenciado versão educacional, que se trata de uma ferramenta de otimização linear ou não-linear para formular problemas, resolvê-los e analisar a solução. A implementação foi realizada em um equipamento da marca Dell, processador i7, 16 Gb, *Solid State Drives* (SSD).

Tendo em vista que a análise tem como objetivo, a aplicação de um modelo que oriente na predição do ganho de tempo de *setup*, comparando o método otimizado com o método empírico, os testes foram realizados dentro de um conjunto de configurações, parametrizados por fatores que estão sujeitos a alterações e que podem influenciar no resultado da otimização.

Conforme Figura 14, os fatores adotados foram:

- a) **Grupo máquina:** apesar de não ser um dado de entrada do problema, merece atenção, pois as amostras analisadas foram processadas em dois grupos de máquinas: *slasher dye*, sendo máquinas mais complexa e de maior tamanho para tingimentos mais elaborados e *loop dye* são máquinas menores de concepção mais simples e tingimentos de baixo custo, sendo assim deve-se analisar os dois grupos separadamente;
- b) **Número de SKU:** este fator é bastante sensível à sazonalidade, podendo variar de forma significativa em função da tendência da moda, e demanda do mercado;
- c) **Horizonte de programação:** quanto mais longe se consegue enxergar a demanda, maiores são as oportunidades de otimização, sendo assim para cada composição de grupo de máquina e número de SKU, foram realizados testes para horizontes diferentes, variando de uma a quatro semanas.

Figura 14 – Critérios de verificação



Fonte: Próprio autor (2021).

4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo Shannon (1975), um modelo é a representação de um objeto, sistema ou ideia em alguma forma outra que não a própria entidade e visa prover uma melhor compreensão das características do sistema real.

Para o estudo do problema escolheu-se o modelo do PCV, que consiste na procura de um circuito que possua a menor distância, começando numa cidade qualquer, entre várias, visitando cada cidade precisamente uma vez e regressando à cidade inicial, fechando um ciclo. No caso mais geral do PCV, a matriz de distâncias entre todos os pontos da rede não é simétrica, indicando que os caminhos de ida e de volta não têm o mesmo comprimento.

No problema estudado, ao invés de cidades tem-se um conjunto de SKUs, sendo que entre cada par de SKU, tem-se um tempo de *setup*. O problema se define em descobrir qual o melhor sequenciamento dentre os SKUs deve ser feito para que o tempo de *setup* seja mínimo.

Existem várias formulações para o PCV, sendo que essas formulações podem ser consideradas como canônicas, pelo fato de ser um problema clássico de otimização amplamente difundido na literatura especializada como por desenvolverem modos peculiares de caracterização do problema.

Para o problema analisado foi utilizada abordagem proposta por Miller, Tucker e Zemlin (MTZ), por ser mais eficiente em termos de número de variáveis e número de restrições (GOLDBARG; LUNA, 2005).

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (27)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = t \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ji} = 1 \quad j = 2, \dots, n \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ji} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (30)$$

$$u_i - u_j + px_{ij} \leq p - 1 \quad 2 \leq i \neq j \leq n \quad (31)$$

$$u \geq 0 \quad 2 \leq i \leq n \quad (32)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (33)$$

As restrições (27), (29) e (30), equivalem as restrições (1), (2) e (3) do modelo DFJ respectivamente. A restrição (28) garante que a cidade origem seja visitada exatamente t vezes, incluindo o retorno final, e esta restrição se aplica ao Problema de Roteamento de Veículo. A restrição (31) impede a formação de sub ciclos. O u_i tem uma representação semelhante aos potenciais nós, em um grafo. O arco (i, j) em toda a solução viável 0-1 dos três primeiros conjuntos de restrições obrigam o conjunto de restrições em p a transformar-se em:

$$u_i - u_j \leq -1 \quad (34)$$

A formulação PCV envolve $O(n^2)$ restrições em $n^2 - 1$ variáveis.

Pode-se considerar duas maneiras para obter uma solução ao problema de sequenciamento usando o PCV, sendo a primeira, considerando que cada SKU será produzido somente uma vez a cada ciclo, determina-se a sequência que minimiza o *setup* total. E a outra maneira consiste em estabelecer um número finito de corridas de produção para uma dada quantidade de SKUs, podendo um SKU ser programado mais de uma vez no ciclo e, depois, determina-se a sequência das corridas que minimiza o *setup* total (CASTRO, 2005).

Trazendo esse modelo para o caso de sequenciamento de tingimento de tecido, considera-se a matriz $V \times V$ com elementos c_{ij} , onde V representa a quantidade total de SKUs, e c_{ij} o tempo de *setup* necessário para ajustar a máquina ao SKU j , desde que o SKU i fosse produzido imediatamente antes. Dada esta condição, pode-se formar um ciclo com os V SKUs tomando os seus respectivos c_{ij} como comprimento de arcos (MAXWELL, 1964).

4.1 Matriz de tempo de *setup*

A empresa estudada é composta por um conjunto de máquinas dividido em dois grupos, sendo o grupo *slasher dye* (multicaixas) e o grupo *loop dye*.

A elaboração da matriz de tempos de *setup* foi estruturada a partir do levantamento dos SKUs processados ao longo de 2018. A partir do conhecimento dos SKUs processados em cada máquina de tingimento, foi possível estruturar uma matriz de tempos de *setup* que foi preenchida pelo coordenador técnico da área, com os tempos de *setup* para cada possível par de SKU. A Tabela 4 mostra um exemplo de matriz $V \times V$ com 38 SKUs para uma máquina *slasher dye* (multicaixas), em que se pode observar uma particularidade que a distingue de uma matriz de distância entre cidades, conforme o problema clássico do PCV, que tem sua diagonal principal igual a zero, pois a distância a percorrer da cidade i para a cidade i é igual a zero. No caso do processo de tingimento, os lotes de produção são finitos, e ao término de cada lote de tingimento de um determinado SKU, se faz necessário reabastecer a máquina com uma nova carga de fio, preparar banhos de tingimento e calibrar os pontos de controle do equipamento, mesmo que o lote seguinte seja referente ao mesmo SKU processado anteriormente, sendo assim o tempo de *setup* entre pares do mesmo SKU será maior que zero, porém menor ou igual que o tempo de *setup* entre pares distintos de SKU (GOMES; PINHEIRO; SARAIVA, 2021).

Outro ponto observado foi que algumas máquinas apresentavam tempos de *setup* igual entre pares de SKUs, sendo assim elas foram descartadas de qualquer tentativa de otimização.

4.2 Estruturação para realização dos testes

Para atingir os objetivos da pesquisa, que propõe a criação de um modelo que oriente na predição da redução do tempo de *setup*, com a adoção de ferramentas de otimização, é necessário que seja realizada uma certa quantidade de testes, em diferentes configurações de processo, de modo a gerar uma quantidade de dados que possam prover uma função capaz de responder a maioria situações, que possam ser encontradas.

Foi avaliado que três fatores são relevantes para a operação, sendo: grupo de máquina, quantidade de SKU e horizonte de planejamento. Como os grupos de máquina já são conhecidos (multicaixas e *loop*) e que horizonte de planejamento irá variar de uma a quatro semanas, resta definir o número de SKUs. Para isso, foi realizada uma análise sobre os dados coletados na empresa, de modo a identificar a quantidade de SKU processado por máquina de tingimento ao longo de 2018. Conforme Tabela 5, têm-se duas colunas para cada máquina, sendo que uma se refere à quantidade de lotes de tingimento e à outra se refere a quantidade de SKU.

Tabela 5 – Quantidade de *Stock Keeping Unit* (SKU) processado

		Quantidade							
		Lote de Tingimento		SKU		Lote de Tingimento		SKU	
		Máquina 1		Máquina 3		Máquina 4			
Slasher Dye (Multi-Caixa)	fev/18	26	13	21	5	21	8		
	mar/18	21	9	18	6	24	8		
	abr/18	30	7	22	6	19	6		
	mai/18	29	12	24	7	23	9		
	jun/18	14	8	14	4	15	8		
	jul/18	21	9	25	6	21	9		
	ago/18	29	14	24	6	25	9		
	set/18	28	12	22	5	20	8		
	out/18	21	6	18	5	18	6		
	nov/18	24	9	21	4	23	11		

		Máquina 6		Máquina 7		Máquina 8	
		Lote de Tingimento	SKU	Lote de Tingimento	SKU	Lote de Tingimento	SKU
Loop	fev/18	22	8	26	19	20	6
	mar/18	19	5	23	10	24	12
	abr/18	22	5	30	14	25	9
	mai/18	24	7	25	11	24	11
	jun/18	13	5	14	11	15	10
	jul/18	25	5	28	16	27	12
	ago/18	25	8	23	13	19	9
	set/18	22	7	25	11	22	9
	out/18	20	6	21	11	17	10
	nov/18	22	6	25	13	21	11

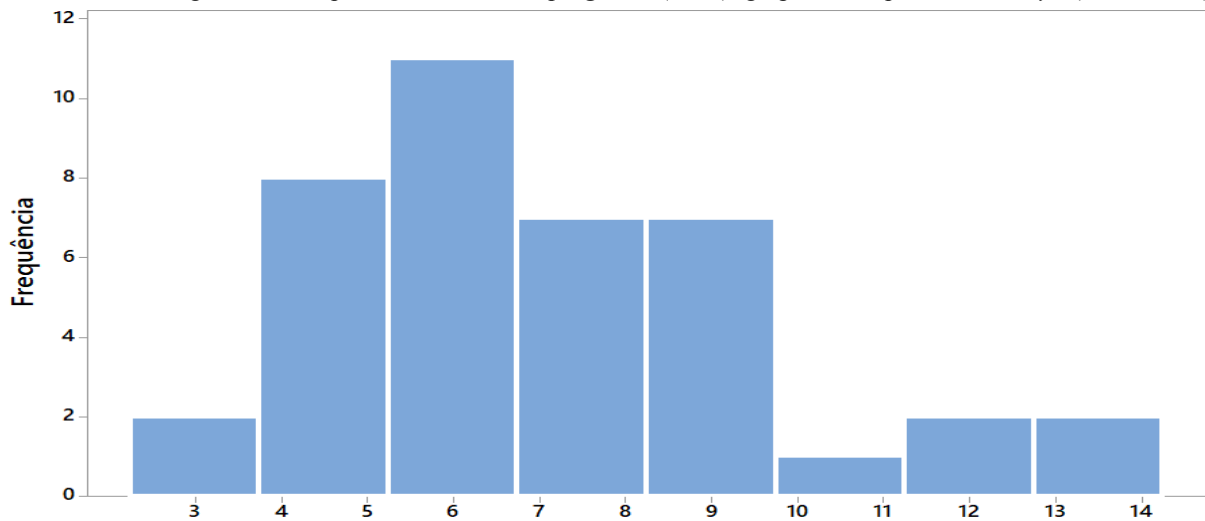
Fonte: Próprio autor (2021).

Conforme Tabela 5, pode-se observar que ao longo do ano a quantidade de SKU varia para cada máquina, isto ocorre em função das características dos artigos ou seja SKU, estarem mais alinhados a configuração de determinadas máquinas. E como a rotatividade de novos produtos é alta para atender a demanda do mercado, nos deparamos com esta flutuação de quantidade de SKU ao longo do ano.

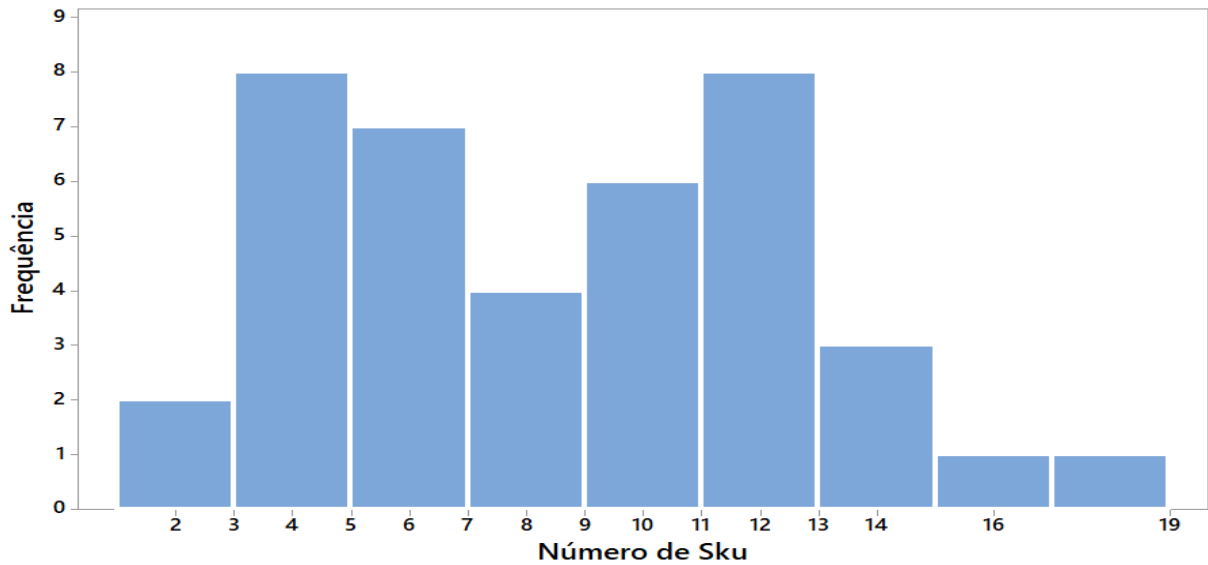
Para que os testes pudessem prover uma boa base de dados para construção do modelo, foi pensando em escolher algumas configurações de SKU que pudessem representar as possíveis situações reais.

Para a seleção das configurações de SKU, foi pensado em construir um histograma que demonstrasse a amplitude da quantidade de SKU produzido ao longo do ano para os dois grupos de máquinas, conforme os Gráficos 4 e 5. A partir desta informação ficou mais claro visualizar o range de SKU produzido para cada grupo de máquina, e assim determinar as configurações que ocorrem com maior frequência, indo da menor quantidade para maior quantidade de SKU.

Gráfico 4 – Histograma da frequência de *Stock Keeping Unit* (SKU): grupo de máquina *slasher dye* (multicaixas)



Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 5 – Histograma da frequência de SKUs: grupo de máquina *loop*

Fonte: Próprio autor (2021).

A partir dos histogramas foi pensado em selecionar uma quantidade de SKUs para testes, de modo a obter uma amplitude de resultados, que possa servir de parâmetros para a construção de uma equação de regressão linear, e que esta possa ser usada em outras empresas com o mesmo processo similar.

Sendo assim para o grupo *slasher dye* foi definido o conjunto de número de SKU 4, 6, 8, 9 e 12. Quanto ao grupo *loop dye* foi definido o conjunto de número de SKU 5, 7, 9, 11, 12, 13 e 16. Este conjunto de dados deve cobrir a maioria de ocorrências possíveis. A Tabela 6 mostra como ficou estruturada as configurações de número de SKUs por máquina de tingimento.

Tabela 6 – Relação de configurações para máquina x SKU

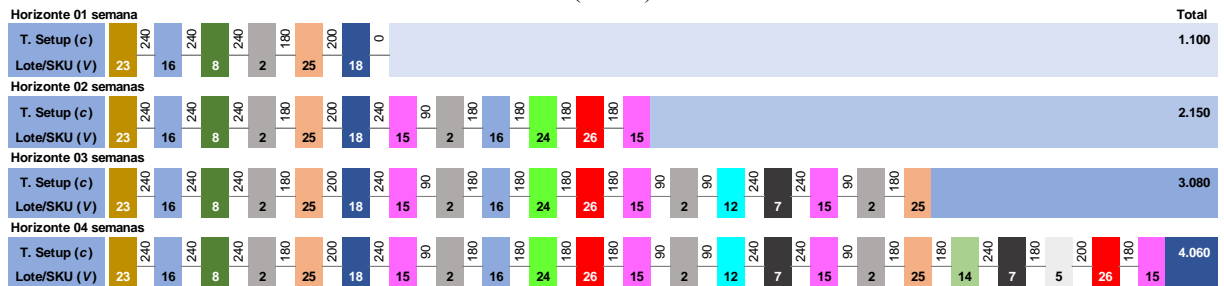
Grupo de Máquina	Nº Máquina	Quantidade SKU
Slasher Dye	1	6
		9
		12
	3	4
4	6	
4	8	
Loop Dye	6	5
		7
	7	11
		13
		16
	8	9
12		

Fonte: Próprio autor (2021).

Com a definição dessas configurações, foi possível avançar na mensuração dos tempos de *setup* conforme o sequenciamento empírico, por meio dos relatórios da empresa. Do relatório, foi possível extrair, para cada máquina, a sequência de processamento ao longo de cada mês, fracionar os horizontes e, com as matrizes de tempo de *setup*, foi possível medir o tempo de *setup* para ir do SKU *i* ao SKU *j*.

Foram realizados um total de 52 testes, sendo 24 testes para no grupo de máquinas multicaixas e 28 testes para o grupo de máquinas *loop*. A Figura 15, apresenta uma aplicação de mensuração do tempo de *setup* realizado na máquina 7, com 13 SKUs. desmembrado em quatro horizontes de tempo.

Figura 15 – Mensuração do tempo de *setup* (minuto): máquina de tingimento 7, com 13 *Stock Keeping Unit* (SKUs)



Fonte: Próprio autor (2021).

Após medir os tempos de *setup* para todas as configurações sugeridas em quatro horizontes de tempo, chega-se nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Tempos de *setup* grupo de máquina *slasher dye* (multicaixas)

Modelo	Máquina	Quantidade	Mês	Horizonte	Tempo (min)	
					Real	
Multi caixa	1	6	out-18	1 semana	810	
				2 semanas	1.560	
				3 semanas	2.490	
				4 semanas	3.360	
	9	mar-18	1 semana	1.080		
			2 semanas	1.680		
			3 semanas	2.310		
			4 semanas	3.430		
	12	set-18	1 semana	1.170		
			2 semanas	2.220		
			3 semanas	3.300		
			4 semanas	4.680		
	Multi caixa	3	4	nov-18	1 semana	740
					2 semanas	1.750
					3 semanas	2.760
					4 semanas	3.660
6		ago-18	1 semana	860		
			2 semanas	2.110		
			3 semanas	3.250		
			4 semanas	4.390		
Multi caixa		4	8	set-18	1 semana	450
					2 semanas	1.530
					3 semanas	2.400
					4 semanas	3.260

Fonte: Próprio autor (2021).

Tabela 8 – Tempos de *setup* grupo de máquina *loop*

Modelo	Máquina	Quantidade	Mês	Horizonte	Tempo (min)
		Sku	Referencia		Real
Loop	6	5	abr-18	1 semana	510
				2 semanas	1.260
				3 semanas	1.950
				4 semanas	2.940
		7	set-18	1 semana	900
				2 semanas	1.800
				3 semanas	2.640
				4 semanas	3.240
	7	11	set-18	1 semana	1.110
				2 semanas	2.010
				3 semanas	3.030
				4 semanas	3.780
		13	ago-18	1 semana	1.100
				2 semanas	2.150
				3 semanas	3.080
				4 semanas	4.060
16		jul-18	1 semana	800	
			2 semanas	1.510	
			3 semanas	2.860	
			4 semanas	3.920	
8	9	set-18	1 semana	660	
			2 semanas	1.770	
			3 semanas	3.150	
			4 semanas	4.550	
		12	jul-18	1 semana	720
				2 semanas	2.100
				3 semanas	3.270
				4 semanas	4.470

Fonte: Próprio autor (2021).

4.3 Modelo de otimização

Para simulação do sequenciamento de tingimento visando obter o menor tempo de setup, foi utilizado o modelo do PCV, com a abordagem proposta pela formulação Miller-Tucker-Zemlin (MTZ), (MILLER; TUCKER; ZEMLIN, 1960), com a contribuição de Desrochers e Laporte (1991) para a tratativa de eliminação de sub-rotas, deixando-a menos vulnerável no relaxamento das restrições. Este modelo foi escolhido, pois trabalha com um número limitado de restrições.

A formulação de eliminação de sub-rotas proposta por MTZ pode ser fortalecida usando a técnica de elevação (DESROCHERS; LAPORTE, 1991).

$$u_i - u_j + (n - 1)x_{ij} + (n - 3)x_{ji} \leq n - 2 \quad 2 \leq i \neq j \leq n \quad (35)$$

Os testes realizados para a obtenção do tempo de setup otimizado foram baseados no modelo MTZ com a formulação (35) para a eliminação de sub-rotas.

Adequando o modelo do PCV ao estudo de caso, partindo da necessidade de produzir uma dada quantidade de n lotes de fabricação para cada SKUs, que devem ser sequenciados de modo a obter o menor tempo *setup*, representado por c_{ij} na formulação (27). Haverá situações que, para um mesmo SKU, a demanda será maior que um lote de fabricação. Sendo assim, cada lote a ser processado se refere à um nó, sendo indexado um código próprio para a construção da matriz de tempo de *setup*, deste modo, um mesmo SKU pode aparecer mais de uma vez na matriz.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Nesta seção, são apresentados e analisados os resultados obtidos pela modelagem matemática do problema estudado.

Conforme Ackoff e Sasieni (1977), embora se faça necessária um grande número de variáveis para prever um fenômeno com perfeita exatidão, um pequeno número de variáveis geralmente explica a maior parte dele. Sendo assim, a seleção correta das variáveis mais significativas é de extrema importância, para modelar um sistema e descrever o seu comportamento.

A fim de garantir uma melhor compreensão para a situação descrita no parágrafo anterior, foi tomado, como exemplo, uma situação real, em que é apresentado o desenvolvimento das ações para avaliar a máquina 7 do grupo *loop*.

Para a máquina em questão, foram realizados testes para três situações de SKUs, conforme Tabela 8, no entanto, para uma boa compreensão, basta descrever apenas uma das situações, pois o racional é o mesmo para todos os outros casos. Sendo assim, descreve-se a situação com 13 SKUs, cujo mês de referência foi agosto de 2018.

Primeiro tem-se a identificação da ordem sequencial, em que os lotes de fabricação para cada SKU, foram processados, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Sequência de processamento máquina 7, 13 SKUs

Código Lote/sku	SKU	Lote de Fabricação	Lotes Fio	Máquina	Metros Consumidos	Metros Produzidos	Perdas Est+Res	Tempo Inicial	Tempo Final
1	23	103402	21E18291	012IND0007	50.481	50.439	-0,08%	31/07/2018 09:03	01/08/2018 19:32
2	16	103407	01E18120	012IND0007	50.256	45.679	-9,11%	01/08/2018 20:21	03/08/2018 16:13
3	8	103405	22S18285	012IND0007	30.606	25.204	-17,65%	03/08/2018 19:00	04/08/2018 16:58
4	2	103404	01E18120	012IND0007	36.581	34.538	-5,59%	04/08/2018 18:27	05/08/2018 17:15
5	25	103410	21E18291	012IND0007	50.025	50.077	0,10%	05/08/2018 19:06	07/08/2018 09:00
6	18	103409	01E18121	012IND0007	37.350	34.232	-8,35%	07/08/2018 09:00	10/08/2018 05:12
7	15	103417	01E18121	012IND0007	50.438	48.391	-4,06%	10/08/2018 05:36	12/08/2018 09:07
8	2	103414	01E18122	012IND0007	36.425	35.466	-2,63%	12/08/2018 09:15	13/08/2018 08:43
9	16	103418	21E18294	012IND0007	50.194	49.633	-1,12%	13/08/2018 08:45	14/08/2018 19:38
10	24	103423	21E18292	012IND0007	50.025	50.616	1,18%	14/08/2018 20:08	16/08/2018 04:19
11	26	103420	21E18294	012IND0007	50.994	49.612	-2,71%	16/08/2018 04:31	17/08/2018 10:22
12	15	103422	01E18122	012IND0007	49.997	50.734	1,47%	17/08/2018 17:36	19/08/2018 02:41
13	2	103427	01E18123	012IND0007	36.469	33.235	-8,87%	19/08/2018 02:46	19/08/2018 23:17
14	12	103425	21E18294	012IND0007	50.306	47.931	-4,72%	19/08/2018 23:36	21/08/2018 06:50
15	7	103429	22S18293	012IND0007	31.231	28.686	-8,15%	21/08/2018 06:52	22/08/2018 05:16
16	15	103425	21E18294	012IND0007	50.100	48.813	-2,57%	22/08/2018 06:42	23/08/2018 13:23
17	2	103430	01E18124	012IND0007	36.431	35.490	-2,58%	23/08/2018 15:54	24/08/2018 15:06
18	25	103431	21E18295	012IND0007	50.850	50.187	-1,30%	24/08/2018 15:07	25/08/2018 21:02
19	14	103432	21E18295	012IND0007	22.021	19.996	-9,20%	25/08/2018 21:43	26/08/2018 12:51
20	7	103432	22S18293	012IND0007	30.644	29.734	-2,97%	26/08/2018 15:53	27/08/2018 20:19
21	5	103437	21E18295	012IND0007	22.300	20.978	-5,93%	27/08/2018 22:06	28/08/2018 13:35
22	26	103435	21E18294	012IND0007	51.381	49.733	-3,21%	28/08/2018 13:55	30/08/2018 01:34
23	15	103436	21E18294	012IND0007	50.463	49.419	-2,07%	30/08/2018 01:36	31/08/2018 23:27

Fonte: Próprio autor (2021).

Partindo da matriz principal que foi construída com todos os SKUs processados na máquina 7, ao longo de 2018, conforme Tabela 10, foi possível construir a matriz de tempos de *setup* para a situação do exemplo. No Apêndice A são mostradas as matrizes de *setup* para todas as máquinas analisadas.

Como será avaliado o resultado de tempo de *setup* para quatros horizontes de programação, fez-se necessário a construção de quatro matrizes de tempos de *setup*, sendo uma para cada horizonte, conforme pode ver na Tabela 11.

Tabela 11 – Tempos de *setup* (minutos) máquina 7

SKU ID	01 semana							02 semanas						03 semanas						04 semanas					
	0	23	16	8	2	25	18	15	2	16	24	26	15	2	12	7	15	2	25	14	7	5	26	15	
	Lote ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	2	0	60	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	
16	3	0	240	40	240	180	200	240	180	180	40	180	40	180	180	180	240	180	180	200	180	240	200	40	180
8	4	0	240	240	90	240	240	60	240	240	240	240	240	240	240	240	180	240	240	240	240	180	180	240	240
2	5	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
25	6	0	240	200	240	180	90	200	180	180	200	180	200	180	180	180	240	180	180	90	180	240	180	200	180
18	7	0	240	240	180	240	200	60	240	240	240	240	240	240	240	240	60	240	240	200	240	60	180	240	240
15	8	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
2	9	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
16	10	0	240	40	240	180	200	240	180	180	40	180	40	180	180	180	240	180	180	200	180	240	200	40	180
24	11	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	60	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
26	12	0	240	40	240	180	200	240	180	180	40	180	40	180	180	180	240	180	180	200	180	240	200	40	180
15	13	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
2	14	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
12	15	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
7	16	0	240	240	180	240	240	60	240	240	240	240	240	240	240	240	60	240	240	240	240	60	180	240	240
15	17	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
2	18	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
25	19	0	240	200	240	180	90	200	180	180	200	180	200	180	180	180	240	180	180	90	180	240	180	200	180
14	20	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90
7	21	0	240	240	180	240	240	60	240	240	240	240	240	240	240	240	60	240	240	240	240	60	180	240	240
5	22	0	240	200	180	180	180	180	180	180	200	180	200	180	180	180	180	180	180	180	180	180	90	200	180
26	23	0	240	40	240	180	200	240	180	180	40	180	40	180	180	180	240	180	180	200	180	240	200	40	180
15	24	0	240	180	240	90	180	240	90	90	180	90	180	90	90	90	240	90	90	180	90	240	180	180	90

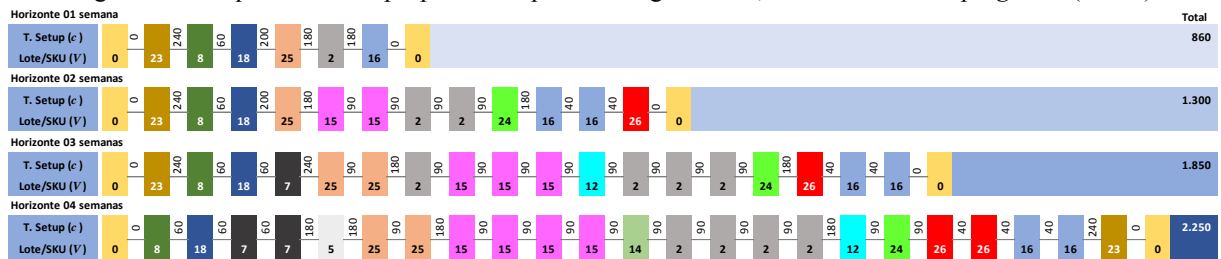
Fonte: Próprio autor (2021).

Pode-se notar que foi incorporado na matriz de tempo de *setup* um SKU que foi chamado de 0, e que possui tempo de *setup* igual a zero para qualquer outro SKU. Este artifício foi utilizado para que ao completar um ciclo de sequenciamento de lotes/SKU, o retorno a partir do último SKU processado fosse para o SKU 0, pois na situação real um novo sequenciamento dificilmente partiria do SKU origem do sequenciamento anterior.

Outra situação que pode ser notada na matriz é que o número de linhas e colunas se refere a quantidade lotes a ser produzido, podendo um SKU ser produzido em mais de um lote. A cada troca de lote existe a necessidade de realizar um *setup* na máquina, mesmo que o SKU do lote seguinte seja igual ao lote do SKU anterior.

A partir do levantamento destes dados foi possível dar andamento aos testes, cujo a parametrização do programa pode ser visualizada no Apêndice B.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, a Figura 16 mostra como ficou o sequenciamento dos lotes/SKU proposto pelo otimizador.

Figura 16 – Sequenciamento proposto: máquina de tingimento 7, com 13 *Stock Keeping Unit* (SKUs)

Fonte: Próprio autor (2021).

Quando os tempos de setup otimizados são comparados aos tempos de setup empíricos temos uma redução significativa, conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Tempos de *setup*, otimizado e real

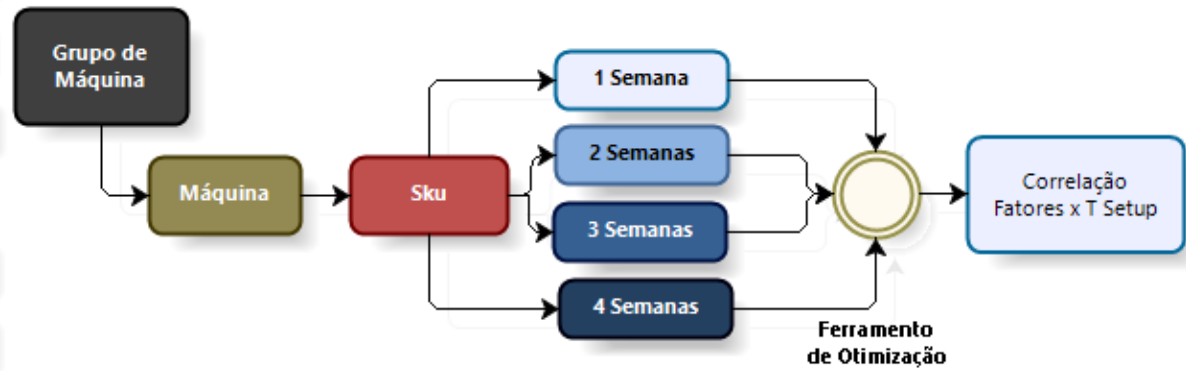
Grupo de Máquina	Número SKU	Horizonte de Programação (semana)	Tempo de Setup (min)			
			Real	Lingo	Varição	%
Loop	13	1 semana	1.100	860	- 240	-22%
		2 semanas	2.150	1.300	- 850	-40%
		3 semanas	3.080	1.850	- 1.230	-40%
		4 semanas	4.060	2.250	- 1.810	-45%

Fonte: Próprio autor (2021).

Este mesmo raciocínio foi aplicado em todas as configurações determinadas nas Tabelas 10 e 11. Tais configurações estariam embasadas em três variáveis: grupo de máquina, número de SKU e horizonte de programação, conforme Figura 17.

Na experimentação computacional, foram simulados ao todo 52 configurações, variando o tipo de máquina, quantidades de SKUs e horizontes de programação.

Figura 17 – Fluxograma de simulação



Fonte: Próprio autor (2021).

Após a realização dos testes foi possível construir a Tabela 13, que tem como produto, os resultados para as possíveis configurações de máquina, assim como o comparativo entre os dois modelos de sequenciamento (empírico e otimizado). A solução reportada é a solução ótima, e o tempo de execução foi muito baixo.

Tabela 13 – Resultados dos tempos de *setup* grupo de multicaixas e *loop*, real e otimizado

Grupo Máquina	Máquina	Quant. SKU		1 semana			2 semanas			3 semanas			4 semanas		
				Real	Otimizado	Delta	Real	Otimizado	Delta	Real	Otimizado	Delta	Real	Otimizado	Delta
Slasher Die	1	6	Tempo (minutos)	810	570	-240	1.560	1.080	-480	2.490	1.530	-960	3.360	2.130	-1.230
			Delta (%)			-30%			-31%			-39%			-37%
	9	Tempo (minutos)	1.080	660	-420	1.680	1.110	-570	2.310	1.560	-750	3.430	2.190	-1.240	
		Delta (%)			-39%			-34%			-32%			-36%	
	12	Tempo (minutos)	1.170	870	-300	2.220	1.680	-540	3.300	2.310	-990	4.680	2.950	-1.730	
		Delta (%)			-26%			-24%			-30%			-37%	
	3	4	Tempo (minutos)	740	740	0	1.750	1.190	-560	2.760	1.640	-1.120	3.660	2.090	-1.570
			Delta (%)			0%			-32%			-41%			-43%
	6	6	Tempo (minutos)	860	710	-150	2.110	1.250	-860	3.250	1.970	-1.280	4.390	2.460	-1.930
			Delta (%)			-17%			-41%			-39%			-44%
	4	8	Tempo (minutos)	450	450	0	1.530	1.020	-510	2.400	1.560	-840	3.260	2.040	-1.220
			Delta (%)			0%			-33%			-35%			-37%
Loop Dye	6	5	Tempo (minutos)	510	510	0	1.260	960	-300	1.950	1.500	-450	2.940	2.040	-900
			Delta (%)			0%			-24%			-23%			-31%
	7	7	Tempo (minutos)	900	750	-150	1.800	1.200	-600	2.640	1.740	-900	3.240	2.190	-1.050
			Delta (%)			-17%			-33%			-34%			-32%
	7	11	Tempo (minutos)	1.110	740	-370	2.010	1.220	-790	3.030	1.910	-1.120	3.780	2.250	-1.530
			Delta (%)			-33%			-39%			-37%			-40%
	13	13	Tempo (minutos)	1.100	860	-240	2.150	1.300	-850	3.080	1.850	-1.230	4.060	2.250	-1.810
			Delta (%)			-22%			-40%			-40%			-45%
	16	16	Tempo (minutos)	860	710	-150	2.110	1.250	-860	3.250	1.970	-1.280	4.390	2.460	-1.930
			Delta (%)			-17%			-41%			-39%			-44%
	8	9	Tempo (minutos)	660	510	-150	1.770	1.140	-630	3.150	1.770	-1.380	4.550	2.150	-2.400
			Delta (%)			-23%			-36%			-44%			-53%
12	12	Tempo (minutos)	1.170	870	-300	2.220	1.680	-540	3.300	2.310	-990	4.680	2.950	-1.730	
		Delta (%)			-26%			-24%			-30%			-37%	

Fonte: Próprio autor (2021).

Por meio dos dados coletados foi possível analisar a correlação entre a variação de tempo de *setup* com os parâmetros, grupo de máquina, número de SKU e horizonte de programação. As informações obtidas foram submetidas à estimativa dos coeficientes de correlação linear (r), por meio do *software* Minitab 17.

O coeficiente de correlação linear, podendo às vezes ser chamado coeficiente de correlação momento-produto de Pearson é representado pela letra r e assume valores de -1 a 1, e mede o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados x e y em uma amostra. Quando $r = 1$, representa a correlação perfeita e positiva entre duas variáveis, e para $r = -1$, representa correlação perfeita negativa entre duas variáveis, ou seja, enquanto uma aumenta a outra diminui (TRIOLA, 1998).

O coeficiente de correlação de Pearson calcula-se segundo a seguinte fórmula:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (41)$$

Onde:

- a) n representa o número de pares de dados presentes;
- b) x, y são os valores da amostra que se deseja avaliar a correlação.

A análise foi realizada de forma separada para cada grupo de máquina, sendo avaliado a correlação entre % de variação com o número de SKU e % de variação com o horizonte de programação. Variação absoluta com o número de SKU e variação absoluta com o horizonte de programação.

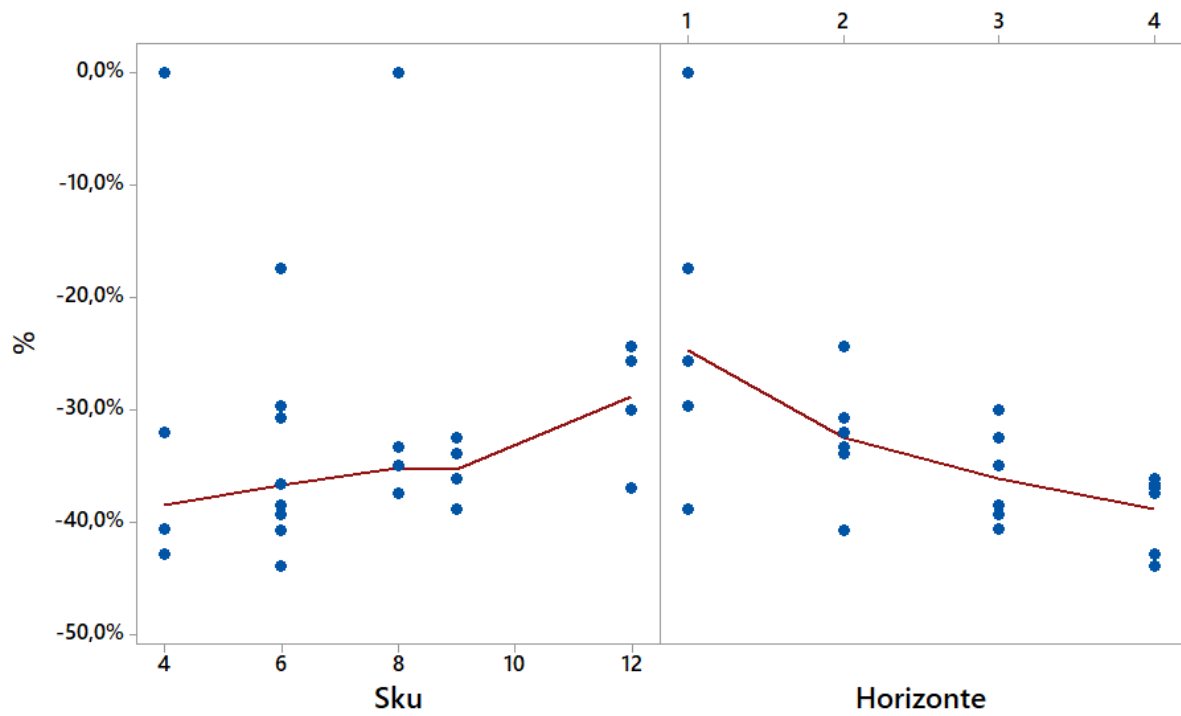
Na Tabela 14, tem-se os resultados de correlação linear referente às máquinas do grupo multicaixas.

Tabela 14 – Coeficiente de correlação linear, grupo de máquinas multicaixas

Multi-Caixa	Coeficiente	% Variação	Variação Absoluta
Número de Sku	r	0,041	0,099
	P-Value	0,848	0,966
Horizonte de Planejamento	r	-0,644	-0,928
	P-Value	0,001	0,000

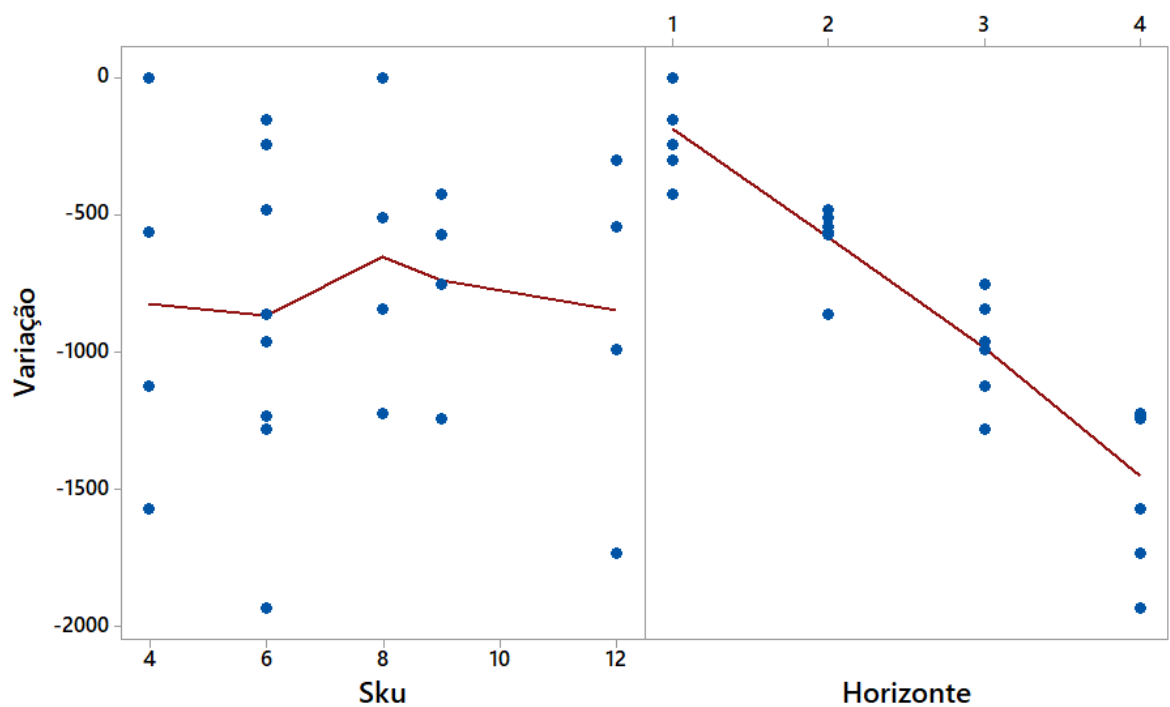
Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 6 – Matriz de dispersão % variação x número de SKU; horizonte de planejamento



Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 7 – Matriz de dispersão variação absoluta x número de SKU; horizonte de planejamento



Fonte: Próprio autor (2021).

Foi analisada a correlação tanto da variação relativa quanto da variação absoluta dos tempos de *setup*, a fim de avaliar possíveis divergências no comportamento dos coeficientes

de correlação linear. Conforme pode-se observar que existe diferença na leitura das informações para entre as duas situações.

Contrariando de certa forma o que se esperava, a correlação do número de SKUs com variação do tempo de *setup* apresentou coeficientes de correlação praticamente nulos, ou seja, não há correlação entre a quantidade de SKUs com a variação do tempo de *setup*. No entanto, o horizonte de planejamento apresentou uma forte correlação negativa com a variação do tempo de *setup*, sendo que o valor de r para variação relativa foi de -0,644 e para a variação absoluta foi de -0,928, ou seja, a variação absoluta apresentou um grau de relacionamento mais forte com o horizonte de planejamento. A correlação negativa mostra que, na medida que se aumenta o horizonte de planejamento, mais o eficiente é o sistema de otimização na redução do tempo de *setup*.

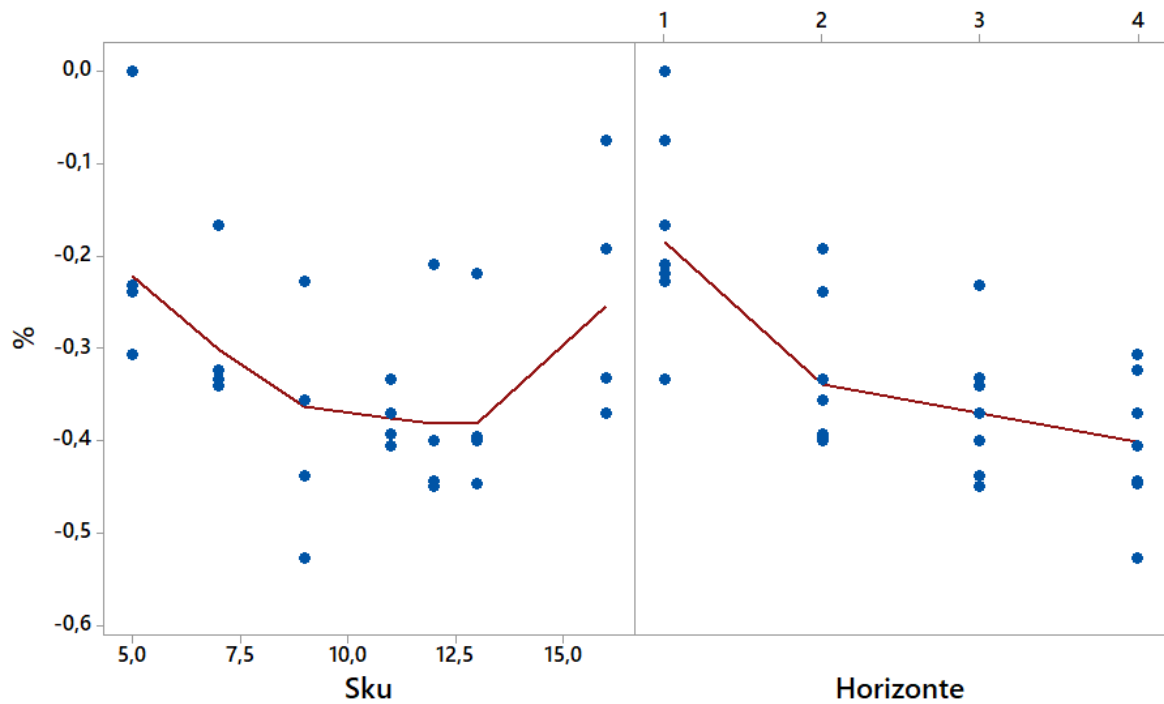
Conforme Tabela 15, têm-se os resultados de regressão linear para as máquinas do grupo *loop*.

Tabela 15 – Coeficiente de correlação linear, grupo máquina *loop*

Loop	Coeficiente	% Variação	Variação Absoluta
Número de Sku	r	-0,171	-0,173
	P-Value	0,386	0,377
Horizonte de Planejamento	r	-0,679	-0,859
	P-Value	0,000	0,000

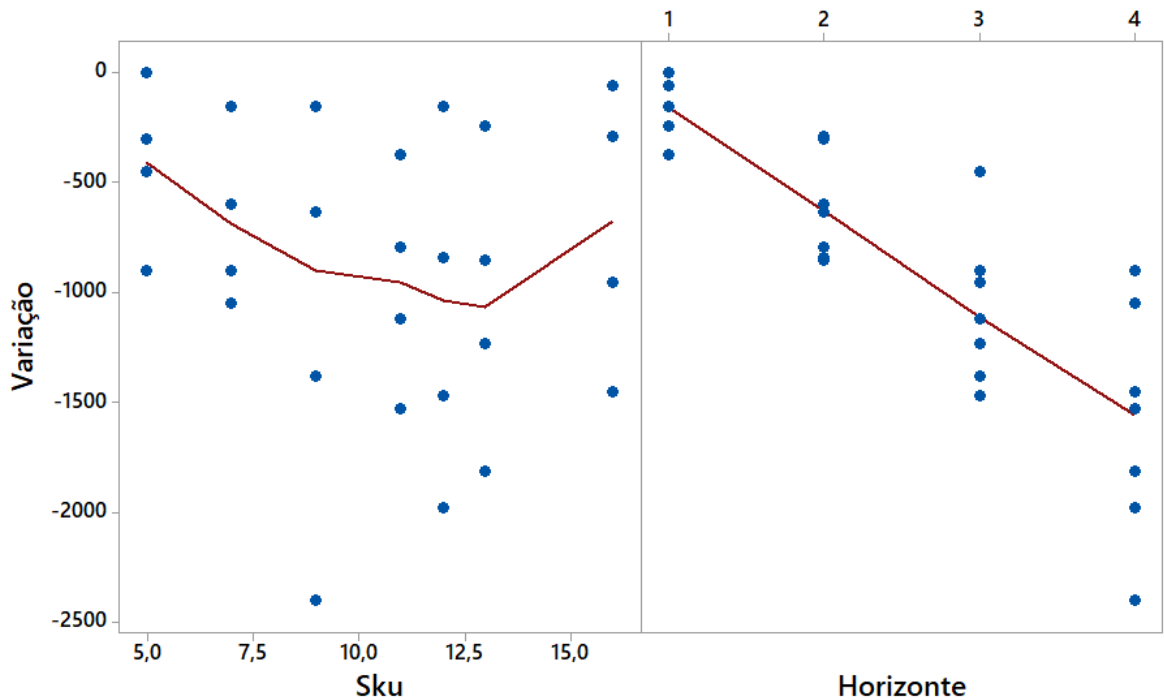
Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 8 – Matriz de dispersão % variação x número de SKU; horizonte de planejamento



Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 9 – Matriz de dispersão variação absoluta x número de SKU; horizonte de planejamento



Fonte: Próprio autor (2021).

O comportamento dos resultados obtido para o grupo de máquinas *loop*, foi semelhante ao do grupo de máquinas multicaixas. Apresentando coeficientes de correlação praticamente nulos, ou seja, não há correlação entre a quantidade de SKUs com a variação do tempo de *setup*. No entanto, o horizonte de planejamento apresentou um grau de relacionamento linear

negativo mais forte com a variação do tempo de *setup*, sendo que o valor de r para variação relativa foi de -0,679 e para a variação absoluta foi de -0,859, ou seja, a variação absoluta apresentou um grau de relacionamento mais forte com o horizonte de planeamento. A correlação negativa mostra que, na medida que se aumenta o horizonte de planeamento, mais o eficiente é o sistema de otimização na redução do tempo de *setup*.

Com base nos resultados apresentados, pode-se propor um modelo baseado em regressão linear que possa prever a variação do tempo de *setup*. No entanto, tal variação deve se referir a variação relativa, apesar de ter apresentado um grau de relacionamento mais fraco quando comparado com a variação absoluta. Não é aconselhável propor um modelo que indique a possível variação absoluta de tempo de *setup*, pois este ao ser replicado em outra operação de processo semelhante, certamente irá se deparar com diferentes tempos de *setup* entre pares de SKU.

Sendo assim, descreve-se a relação, por meio da equação da reta que representa a relação entre a variação do tempo de *setup* com o horizonte de planeamento.

Dada uma coleção de dados amostrais emparelhados, a equação de regressão simples descreve a relação entre duas variáveis.

E sua representação se dá pela equação:

$$y = b_0 + b_1x \quad (42)$$

Sendo:

- a) y variável dependente ou variável resposta;
- b) x variável independente ou variável preditora;
- c) b_0 intercepto de y ;
- d) b_1 coeficiente angular.

Aplicando o método da regressão linear simples para o grupo de máquina multicaixas, obteve-se os seguintes dados:

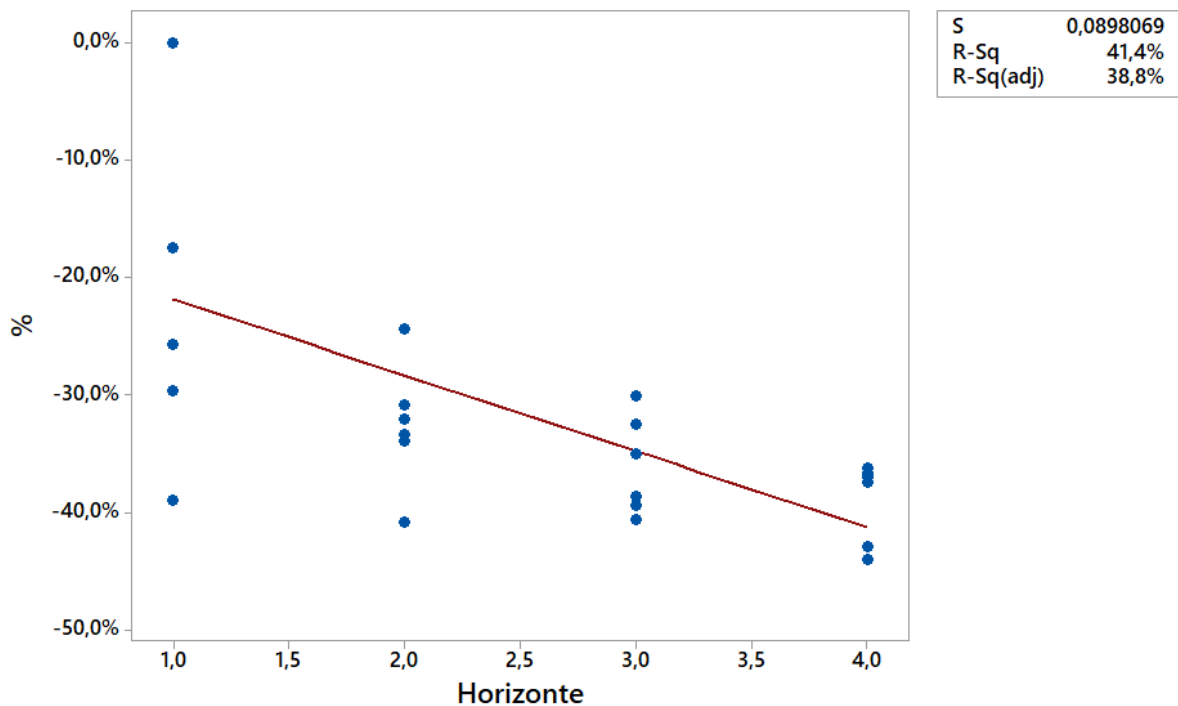
Tabela 16 – Coeficientes grupo de máquina multicaixas

Termos	Coeficiente	Se Coeficiente	T-Value	P-Value	r^2
b_0	-0,1536	0,0449	-3,42	0,002	41,43%
b_1	-0,06468	0,0164	-3,94	0,001	
Equação	% <i>Variação</i> = -0,1536 - 0,0647(Horizonte de Planejamento)				

Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 10 – Regressão linear simples, grupo de máquina multicaixas

$$\% = -0,1536 - 0,06468 \text{ Horizonte}$$



Fonte: Próprio autor (2021).

Aplicando o método da regressão linear simples para o grupo de máquina *loop*, obteve-se os seguintes dados:

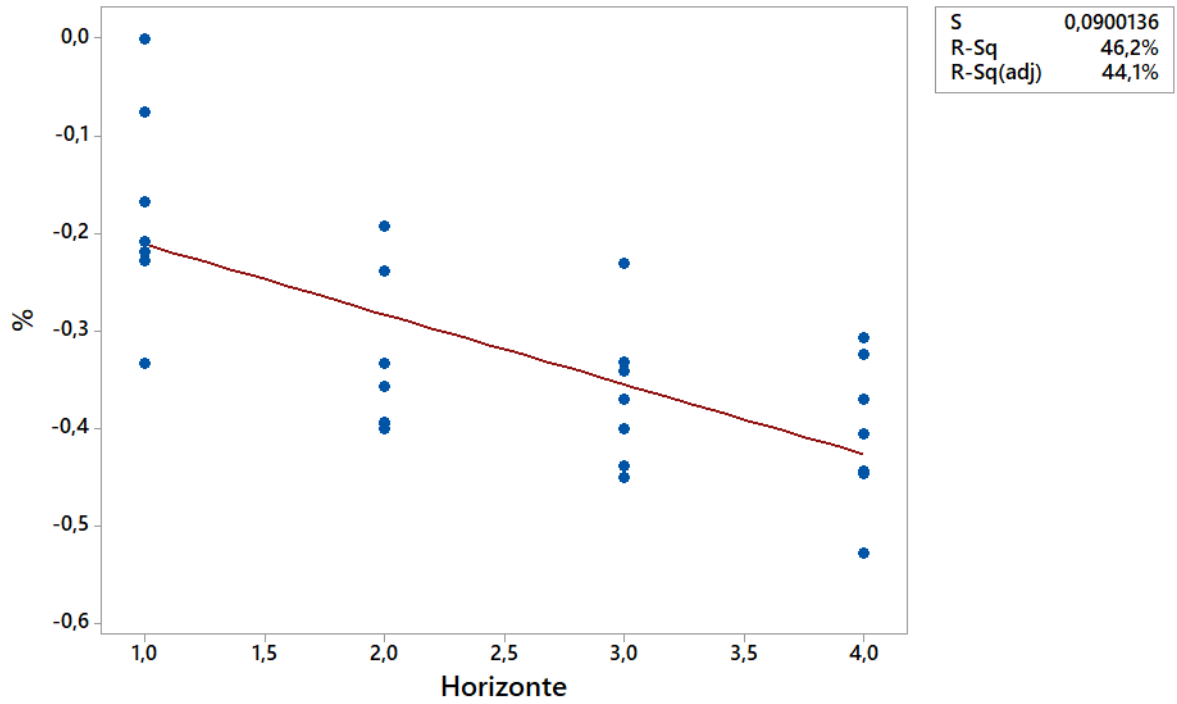
Tabela 17 – Coeficientes grupo de máquina *loop*

Termos	Coeficiente	Se Coeficiente	T-Value	P-Value	r^2
b_0	-0,1389	0,0417	-3,33	0,0030	46,17%
b_1	-0,07185	0,0152	-4,74	0,0000	
Equação	% <i>Variação</i> = -0,1389 - 0,07185 (Horizonte de Planejamento)				

Fonte: Próprio autor (2021).

Gráfico 11 – Regressão Linear Simples, grupo de máquina multicaixas

$$\% = - 0,1389 - 0,07185 \text{ Horizonte}$$



Fonte: Próprio autor (2021).

6 CONCLUSÃO

Com base no que foi levantado na pesquisa, o presente estudo teve como objetivo geral propor um modelo de análise da programação e sequenciamento do tingimento de tecidos, por meio do estudo de um caso real, avaliando o impacto no tempo de *setup* mediante aplicação da PO, especificamente, PLI, utilizando o PCV como abordagem.

As partes interessadas no processo de programação e sequenciamento da produção precisavam conhecer cientificamente as oportunidades de redução do tempo de *setup*, a partir da aplicação de ferramentas de otimização na operação, visando justificar investimentos de recursos que propiciem condições adequadas para a aplicação de ferramentas de otimização no processo de tingimento. Dada a sua relevância no processo de fabricação de tecidos tipo denim, o processo de tingimento, sendo realizado de forma adequada pode gerar ganhos que vão além da redução de tempos de *setup*, como diminuição de refugo (estopa de fios) e gastos com tratamento de efluentes.

O presente trabalho buscou trazer para o campo da ciência, um modelo de solução para o problema de sequenciamento do tingimento de tecido, por meio do estudo de um caso real, identificando a relação de parâmetros inerentes do processo com a variação do tempo de *setup*.

O estudo trouxe à luz a relação de alguns de parâmetros inerentes do processo (grupo de máquina, número de SKU e horizonte de programação), com a variação do tempo de *setup*. No caso do resultado da inexistência de correlação entre o número de SKU e tempo de *setup*, pode estar relacionado a condição da operação, pois a necessidade de *setup* no equipamento não está relacionada a mudança do SKU, e sim entre o termino de um lote de tingimento e o início do outro, mesmo que o SKU do lote predecessor seja igual ao SKU do lote posterior. No entanto caberia um maior aprofundamento por meio de um Teste de Hipótese, para confirmar a inexistência de correlação.

O *modus operandi* da operação também merece atenção, pois o setor de tingimento trabalha para abastecer a tecelagem com rolos de urdume, e assim manter os teares em operação para que não haja ruptura na produção de tecido. O grau de complexidade do sequenciamento do tingimento se dá pelo motivo da tecelagem (fase sucessora) não conseguir se adequar ao sequenciamento proposto pela fase predecessora (tingimento), sendo assim o

sequenciamento do tingimento é elaborado em função da necessidade da tecelagem. Outra restrição, que impacta na qualidade do sequenciamento do tingimento, é a limitação de estoque de rolos intermediários entre tingimento e tecelagem, limitando a flexibilidade do tingimento. A depender do sequenciamento otimizado proposto, pode haver ruptura de abastecimento na tecelagem, pois este além de sujeito a não coincidir com a necessidade da tecelagem, pode não haver estoque de rolos intermediário que absorva este descompasso, acarretando em parada de máquina. Deste modo, o programador irá se deparar com o *trade off* entre o sequenciamento do tingimento e o abastecimento da tecelagem.

Para lidar com este problema, propõe-se discutir sobre ponto de desacoplamento. Segundo Mason-Jones e Towill (1999), o ponto de desacoplamento se refere à posição dentro da cadeia de suprimentos, em que o fluxo produtivo muda de empurrado para puxado, correspondendo ao Ponto de Penetração da Demanda. É a separação entre o que é produzido para estoque e que é produzido sob encomenda. Neste caso, propõe-se deslocar o ponto de desacoplamento do estoque de produto acabado (maior valor agregado) para o estoque intermediário entre os setores de tingimento e tecelagem (menor valor agregado), elevando o estoque de rolos de urdume, de modo que o sequenciamento do tingimento não comprometa o abastecimento da tecelagem. Consequentemente, espera-se um ganho de capital de giro, devido à diferença de valor agregado dos dois estoques.

Espera-se que este trabalho desperte o interesse das indústrias têxteis para a utilização de técnicas de PO na solução de problemas no processo produtivo, utilizando modelos matemáticos e softwares para simulações reais, permitindo uma visão ampla e contribuindo na tomada de decisão.

6.1 Limitações do estudo

O presente estudo focou em trazer para o campo da ciência, um modelo que contribuísse em informar a margem de redução do tempo de setup no sequenciamento de tingimento de tecido, com a aplicação de ferramentas de otimização estruturada no modelo do PCV.

Foram destacados cientificamente, a influência de alguns parâmetros com o tempo de setup. Os resultados alcançados servem como subsídios norteadores de ações estratégicas para o processo de tingimento.

6.2 Sugestões para estudos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, considera-se pertinente a continuidade da pesquisa com uma tese de doutorado, desenvolvendo ferramentas que possam encontrar a melhor solução de sequenciamento da produção avaliando mais de um processo produtivo, levando em consideração os estoques intermediários e atrasos na operação.

REFERÊNCIAS

- ABIT. **Perfil do setor**: dados gerais do setor referentes a 2018 (atualizados em dezembro de 2019). 2019. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 1 nov. 2020.
- ACKOFF, R. L.; SASIENI, M. W. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.
- ALBIN, A. M.; GAUDREAU, J.; QUIMPER, C. G. Leverage constraint scheduling: a case study to the textile industry. *In: INTEGRATION OF CONSTRAINT PROGRAMMING, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, AND OPERATIONAL RESEARCH*, 2020.
- ALLAHVERDI, A.; NG, C. T.; CHENG, T. C. E.; KOVALYOV, M. Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. **European Operational Research**, [s. l.], v. 187, p. 985-1032, 2008.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**: métodos e modelos para análise de decisões. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- APPLEGATE, D. L.; BIXBY, R. E.; CHVÁTAL, V.; COOK, W. J. **The traveling salesman problem**: a computational study. New Jersey: Princeton, 2006.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional**: para cursos de administração, contabilidade e economia. Rio de Janeiro: Elsevier 2012.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CARVALHO, M. F.; SILVA FILHO, O. F.; FERNANDES, C. A. O. O planejamento da manufatura – práticas industriais e métodos de otimização. **Revista Gestão & Produção**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 34-59, 1998.
- CARVALHO, R. M. **Otimização bi-objetivo para o problema de sequenciamento de tarefas em uma máquina com tempos de preparação dependente da sequência**. 2002. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- CASTRO, J. G. **A Programação de Lotes Econômicos de Produção (ELSP) com tempos e custo de setup dependentes da sequência**: um estudo de caso. **Revista Gestão da Industrial**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 60-70, 2005.
- CHIAVENATO, I. **Gestão da produção**: uma abordagem introdutória. 3. ed. São Paulo: Manole, 2017.
- COLIN, E. C. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- COOK, S. A. An overview of computational complexity. **Communications of the ACM**, New York, v. 26, n. 6, p. 401-407, 1983.

COOPER, H. M. **The integrative research review**. Beverly Hills, CA: Sage, 1984.

DESROCHERS, M.; LAPORTE, G. Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints. **Elsevier Science Publishers**, [s. l.], 1991.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica cultural. **Moda Palavra e-Periódico**, [s. l.], v. 8, n. 15, 2015.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-Completeness. *In*: LIBRARY OF CONGRESS CATALOGING IN PUBLICATION DATA, [s. l.], 1979.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; GUIMARÃES, E. M. A divide and merge heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 133, p. 183-189, 2001.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (orgs.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2009. (Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica –Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

GOLDBARG, M. C.; LUNA H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro. Elsevier, 2005.

GOMES, U. T.; PINHEIRO, P. R.; SARAIVA, R. D. Dye Schedule Optimization: A Case Study in a Textile Industry. **Applied Sciences**, [s. l.], 2021.

GUIMARÃES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Modeling lot sizing and scheduling problems with sequence dependent setups. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], 2014.

HAX, A. C.; CANDEA, D. **Production and inventory management**. Nova Jersey: Prentice Hall, 1984.

IEMI. **Brasil têxtil**: relatório setorial da indústria têxtil brasileira. São Paulo, v. 20, n. 20, 2020.

JACKSON, R. H. F.; JONES, A. W. T. An architecture for decision making in the factory of the future. **Interfaces**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 15-28, 1987.

KAUARK, F. da S.; MANHÊS, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia de pesquisa**: guia prático. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

KELLER, P. F. **Globalização e mudanças na cadeia têxtil brasileira**. São Luiz: Edufma, 2010.

LAGEVIN, A.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J. Classification of Travelling Salesman Problem Formulations. **Operational Research Letters**, North Holand, 1990.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Técnicas de pesquisa**: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

LIMA, F.; FERREIRA, P. **Índigo**: tecnologias, processos, tingimento, acabamento. [S. l.]: Fiação e Tecelagem São José S/A, 2001.

LUSTOSA, L. et al. **Planejamento e controle da produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MENDES JUNIOR, B. O. Setor têxtil. **Caderno Setorial ETENE**, [s. l.], ano 5, n. 142, 2020.

MASON-JONES, R.; TOWILL, D. R. Using the information decoupling point to improve supply chain performance. **The International Journal of Logistics Management**, [s. l.], v. 10, p. 13-28, 1999.

MASUTTI, T. A.; CASTRO, L. N. A self-organizing neural network using ideas from the immune system to solve the traveling salesman problem. **Information Sciences**, [s. l.], v. 179, p. 1454-1468, 2009.

MAXWELL, W. L. The scheduling of economic lot sizes. **Naval Research Logistics**, [s. l.], v. 11, p. 89-124, 1964.

MILLER, C. E.; TUCKER, A. W.; ZEMLIN, R. A. **Integer programming formulation of travelin salesman problem**. [S. l.]: Editora, 1960.

PARDINI, D. **O problema do caixeiro viajante**. 2015. Disponível em: <https://otimizacaonapratica.com/2015/11/09/o-problema-do-caixeiro-viajante/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

PAUL, R. Denim and jeans: An overview. **Denim - Manufacture, Finishing and Applications**, [s. l.], p. 1-11, 2015.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Estudo de sistema produtivo – bens de consumo**. 2018. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2018/5/industria-2027-estudo-de-sistema-produtivo/#industria-2027-estudo-de-sistema-produtivo-bens-de-consumo>. Acesso em: 1 nov. 2020.

PORTER, M. E. What is strategy. **Harvard Business Review**, [s. l.], Nov. 1996.

PORTER, M. E. The five competitive forces that shape strategy. **Harvard Business Review**, [s. l.], Jan. 2008.

SEURING, S.; GOLDBACH, M.; KOPLIN, J. Managing time and complexity in supply chains: two cases from the textile industry. **Int. J. Integrated Supply Management**, [s. l.], v. 1, n. 2, 2004.

SHANNON, R. E. **Systems simulation: the art and Science**. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1975.

SILVA, G. A. N.; SILVA, F. A.; RUSSI, D. T. A.; PAZOTI, M. A.; SISCOUTO, R. A. Algoritmos heurísticos construtivos aplicados ao problema do caixeiro viajante para a definição de rotas otimizadas. **Colloquium Exactarum**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 30-46, jul./dez. 2013.

SOLEM, O. Contribution to the solution of sequencing problems in the process industry. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 12, p. 55-75, 1974.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

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

YIN, R. K. **Estudo de caso-: planejamento e métodos**. [S. l.]: Bookman, 2015.

ZACCARELLI, S. B. **Programação e controle da produção**. 5. ed. São Paulo: Pioneira, 1979.

ZHANG, R.; CHANG, P. C.; SONG, S.; WU, C. A multi-objective artificial bee colony algorithm for parallel batch-processing machine scheduling in fabric dyeing processes. **Knowledge-Based Systems**, [S. l.]: 2016.

Matriz de tempo de setup: máquina 3

SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	90	90	240	200	240	240	120	200	90	90
2	90	90	240	200	240	240	120	200	90	90
3	240	240	40	180	240	240	240	240	240	240
4	240	240	180	90	240	240	240	90	240	240
5	240	200	240	200	90	200	200	200	200	200
6	240	240	240	200	240	90	240	200	240	240
7	120	120	240	200	240	240	90	200	120	120
8	240	240	180	90	240	240	240	90	240	240
9	90	90	240	200	240	240	120	200	90	90
10	90	90	240	200	240	240	120	200	90	90

Matriz de tempo de setup: máquina 4

SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	90	200	180	120	180	120	240	180	200	240	240	160	240	240	240	240	240	240	240	160	180	160
2	180	90	120	200	120	240	240	180	240	200	200	180	240	240	240	240	240	240	240	180	120	180
3	180	120	90	180	90	180	240	240	240	90	90	200	240	200	240	240	240	240	240	200	90	240
4	120	200	180	90	180	90	200	240	200	180	180	180	240	240	200	200	200	200	200	180	180	180
5	180	120	90	180	90	180	240	240	240	90	90	200	240	200	240	180	240	240	240	200	90	240
6	120	200	180	90	180	90	200	240	200	180	180	180	240	240	200	180	200	200	200	180	180	180
7	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
8	180	120	200	240	200	240	240	90	240	200	200	240	240	200	240	240	240	240	240	240	240	240
9	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
10	180	120	90	180	90	180	240	240	240	90	90	200	240	200	240	180	240	240	240	200	90	240
11	180	120	90	180	90	180	240	240	240	90	90	200	240	200	240	240	240	240	240	200	90	240
12	160	180	240	180	240	180	200	240	200	240	240	90	240	240	200	200	200	200	200	90	240	90
13	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	240	240
14	240	240	200	240	200	240	180	200	180	200	200	240	240	90	180	180	180	180	180	240	200	240
15	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
16	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
17	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
18	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
19	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
20	240	240	240	200	180	180	90	240	90	180	240	200	240	180	90	90	90	90	90	200	240	200
21	160	180	240	180	240	180	200	240	200	240	240	90	240	240	200	200	200	200	200	90	240	90
22	180	120	90	180	90	180	240	240	240	90	90	200	240	200	240	240	240	240	240	200	90	240
23	160	180	240	180	240	180	200	240	200	240	240	90	240	240	200	200	200	200	200	90	240	90

Matriz de tempo de setup: máquina 6

SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
2	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
3	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
4	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
5	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
6	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
7	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
8	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
9	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
10	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
11	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
12	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
13	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
14	90	240	240	240	240	90	90	90	90	240	240	90	90	90	240	240
15	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90
16	240	90	90	240	90	240	240	240	240	90	90	240	240	240	90	90

Matriz de tempo de setup: máquina 8

SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
2	300	90	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
3	200	300	60	200	200	200	200	200	200	200	240	200	200	200	200	200	200	200	200	140	200	200	200	240	140	120	200	200	200	200	200	
4	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
5	240	300	200	240	60	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	60	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
6	240	300	200	240	90	60	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	60	60	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
7	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
8	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
9	240	300	200	240	90	90	240	240	60	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
10	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
11	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	
12	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	60	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
13	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
14	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	60	60	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
15	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	60	60	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
16	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	60	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
17	240	300	200	240	90	60	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	60	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
18	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	60	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
19	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
20	180	240	120	180	240	240	180	180	240	180	240	240	150	180	240	240	180	180	180	90	180	240	180	240	180	140	180	200	200	200	180	
21	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	60	60	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
22	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	60	60	90	240	200	200	240	90	90	90	240	
23	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	60	240	200	200	240	90	90	60	240	
24	240	300	240	240	240	240	240	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	40	240	240	240	240	240	240	240	
25	180	300	120	180	240	240	180	180	240	180	240	240	150	180	240	240	180	180	180	180	180	180	240	180	240	140	180	200	200	200	180	
26	200	300	120	200	200	200	200	200	200	200	240	200	200	200	200	200	200	200	200	140	200	200	200	240	140	60	200	200	200	200	200	
27	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	
28	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	60	90	90	240	
29	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	90	240	200	200	240	90	60	90	240	
30	240	300	200	240	90	90	240	240	90	240	240	90	240	90	90	90	90	90	240	200	90	90	60	240	200	200	240	90	90	60	240	
31	90	300	200	90	240	240	90	90	240	90	240	240	90	240	240	240	240	240	90	200	240	240	240	240	200	200	90	240	240	240	90	

APÊNDICE B – PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO

Parametrização para uma semana de horizonte de programação.

```

MODEL:
SETS:
  CITY / 1..7/: U; ! U( I) = Sequencia das maquinas de indico;
  LINK( CITY, CITY):
    DIST, ! The distance matrix;
    X; ! X( I, J) = 1 if we use link I, J;
ENDSETS
DATA: !Distance matrix, it need not be symmetric;
  DIST =
0    0    0    0    0    0
0    60   240  240  240  240  240
0    240  40   240  180  200  240
0    240  240  90   240  240  60
0    240  180  240  90   180  240
0    240  200  240  180  90   200
0    240  240  180  240  200  60;

ENDDATA

!The model:Ref. Desrochers & Laporte, OR Letters,
Feb. 91;
N = @SIZE( CITY);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K):
  ! It must be entered;
  @SUM( CITY( I)| I #NE# K: X( I, K)) = 1;
  ! It must be departed;
  @SUM( CITY( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;
  ! Weak form of the subtour breaking constraints;
  ! These are not very powerful for large problems;
  @FOR( CITY( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
    U( J) >= U( K) + X ( K, J) -
      ( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
      ( N - 3) * X( J, K)
  );
);
! Make the X's 0/1;
@FOR( LINK: @BIN( X));
! For the first and last stop we know...;
@FOR( CITY( K)| K #GT# 1:
  U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
  U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```

Parametrização para duas semanas de horizonte de programação.

```

MODEL:
SETS:
  CITY / 1..13/: U; ! U( I ) = Sequencia das maquinas de indico;
  LINK( CITY, CITY):
    DIST, ! The distance matrix;
    X; ! X( I, J ) = 1 if we use link I, J;
ENDSETS
DATA: !Distance matrix, it need not be symmetric;
  DIST =
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 60 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180
0 240 240 90 240 240 60 240 240 240 240 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180
0 240 240 180 240 200 60 240 240 240 240 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 60 180 90
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90;

ENDDATA

!The model:Ref. Desrochers & Laporte, OR Letters,
Feb. 91;
N = @SIZE( CITY);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K):
  ! It must be entered;
  @SUM( CITY( I)| I #NE# K: X( I, K) ) = 1;
  ! It must be departed;
  @SUM( CITY( J)| J #NE# K: X( K, J) ) = 1;
  ! Weak form of the subtour breaking constraints;
  ! These are not very powerful for large problems;
  @FOR( CITY( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
    U( J) >= U( K) + X( K, J) -
      ( N - 2) * ( 1 - X( K, J) ) +
      ( N - 3) * X( J, K)
  );
);
! Make the X's 0/1;
@FOR( LINK: @BIN( X));
! For the first and last stop we know...;
@FOR( CITY( K)| K #GT# 1:
  U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
  U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```


Parametrização para três semanas de horizonte de programação.

```

MODEL:
SETS:
  CITY / 1..19/: U; ! U( I) = Sequencia das maquinas de indico;
  LINK( CITY, CITY):
    DIST, ! The distance matrix;
    X; ! X( I, J) = 1 if we use link I, J;
ENDSETS
DATA: !Distance matrix, it need not be symmetric;
  DIST =
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 60 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 180 200
0 240 240 90 240 240 60 240 240 240 240 240 240 240 240 180 240 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 90
0 240 240 180 240 200 60 240 240 240 240 240 240 240 240 60 240 240 200
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 180 200
0 240 180 240 90 180 240 90 180 60 180 90 90 90 90 240 90 90 180
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 180 200
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 240 180 240 240 60 240 240 240 240 240 240 240 60 240 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 180 240 90 180 240 90 180 90 180 90 180 90 90 240 90 90 180
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 90;

ENDDATA

!The model:Ref. Desrochers & Laporte, OR Letters,
Feb. 91;
N = @SIZE( CITY);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K):
  ! It must be entered;
  @SUM( CITY( I)| I #NE# K: X( I, K) ) = 1;
  ! It must be departed;
  @SUM( CITY( J)| J #NE# K: X( K, J) ) = 1;
  ! Weak form of the subtour breaking constraints;
  ! These are not very powerful for large problems;
  @FOR( CITY( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
    U( J) >= U( K) + X( K, J) -
    ( N - 2) * ( 1 - X( K, J) ) +
    ( N - 3) * X( J, K)
  );
);
! Make the X's 0/1;
@FOR( LINK: @BIN( X));
! For the first and last stop we know...;
@FOR( CITY( K)| K #GT# 1:
  U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
  U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```

Parametrização para quatro semanas de horizonte de programação.

```

MODEL:
SETS:
  CITY / 1..24/: U; ! U( I) = Sequencia das maquinas de indico;
  LINK( CITY, CITY):
    DIST, ! The distance matrix;
    X; ! X( I, J) = 1 if we use link I, J;
ENDSETS
DATA: !Distance matrix, it need not be symmetric;
  DIST =
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 60 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240 240
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 180 200 180 240 200 40 180
0 240 240 90 240 240 60 240 240 240 240 240 240 240 240 180 240 240 240 240 180 180 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 240 180 90 180 240 200 180
0 240 240 180 240 200 60 240 240 240 240 240 240 240 240 60 240 240 200 240 60 180 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 200 180 240 200 40 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 200 180 240 200 40 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 240 180 90 180 240 200 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 240 180 240 240 60 240 240 240 240 240 240 240 240 60 240 240 240 240 60 180 240 240
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 200 240 180 90 200 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 240 180 90 180 240 200 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90
0 240 240 180 240 240 60 240 240 240 240 240 240 240 240 60 240 240 240 240 60 180 240 240
0 240 200 180 180 180 180 180 180 200 180 200 180 180 180 240 180 180 240 180 90 180 240 200 180
0 240 40 240 180 200 240 180 180 40 180 40 180 180 180 240 180 180 200 180 240 200 40 180
0 240 180 240 90 180 240 90 90 180 90 180 90 90 90 240 90 90 180 90 240 180 180 90

```

```

ENDDATA

!The model:Ref. Desrochers & Laporte, OR Letters,
Feb. 91;
N = @SIZE( CITY);
MIN = @SUM( LINK: DIST * X);
@FOR( CITY( K):
  ! It must be entered;
  @SUM( CITY( I)| I #NE# K: X( I, K) = 1;
  ! It must be departed;
  @SUM( CITY( J)| J #NE# K: X( K, J) = 1;
  ! Weak form of the subtour breaking constraints;
  ! These are not very powerful for large problems;
  @FOR( CITY( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:
    U( J) >= U( K) + X( K, J) -
      ( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +
      ( N - 3) * X( J, K)
  );
);
! Make the X's 0/1;
@FOR( LINK: @BIN( X));
! For the first and last stop we know...;
@FOR( CITY( K)| K #GT# 1:
  U( K) <= N - 1 - ( N - 2) * X( 1, K);
  U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1)
);
END

```