

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

IGOR CARLOS PULINI

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO, SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO
DE LOTES EM MÚLTIPLAS LINHAS DE PRODUÇÃO**

PORTO ALEGRE

2018

IGOR CARLOS PULINI

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO, SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO
DE LOTES EM MÚLTIPLAS LINHAS DE PRODUÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Michel José Anzanello, PhD.

Porto Alegre

2018

IGOR CARLOS PULINI

**SISTEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO, SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO
DE LOTES EM MÚLTIPLAS LINHAS DE PRODUÇÃO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Michel José Anzanello, PhD.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, PhD.
Coordenador PPGEP/UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Marcelo Farenzena (PPGEQ/UFRGS)

Prof. Ricardo Augusto Cassel (PMPEP/UFRGS)

Prof. Guilherme Luz Tortorella (PPGEP/UFSC)

*Dedico esta tese aos meus pais (Jair e Angelina),
ao meu filho (João Pedro) e minha linda esposa (Silvany),
às minhas irmãs (Carla e Claudia).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força e por iluminar meu caminho com pessoas que tornaram este trabalho possível.

Meu agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Michel José Anzanello pela dedicação, pelos ensinamentos, a atenção e as críticas construtivas que permitiram a construção deste trabalho.

Aos professores do programa de doutorado em Engenharia de Produção, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Prof. Francisco Kliemann Neto, Prof. José Luiz Duarte Ribeiro, Profa Carla Schwengber ten Caten, Profa. Márcia Echeveste, Profa. Carla Schwengber ten Caten, Prof. Marcelo Cortimiglia, Profa. Lia Buarque Guimarães, Prof. Tarcísio Saurin, Prof. Flávio Fogliatto, meu muito obrigado pela a orientação.

Ao grande amigo de doutorado Lucas Louzada Pereira pela amizade, parceria e todos momentos inesquecíveis que compartilhamos nesta caminhada.

Ao professor Allan Francisco Forzza Amaral que abriu as portas do IFES-Colatina e me apresentou ao edital deste doutorado.

Ao Professor Renan Osório Rios, grande amigo que sempre me apoiou e motivou.

Aos amigos e professores Victorio Albani de Carvalho e Julio Cesar Nardi que sempre estiveram ao meu lado, me orientando e servindo de inspiração para minha vida acadêmica e profissional.

Ao meu orientando Maykel Rodrigues pela dedicação, disponibilidade e amizade.

A toda a coordenadoria de informática do IFES-Colatina pelo incentivo e colaboração.

Muito obrigado a Henrique Gomes Basoni do São Bernardo Saúde pelo apoio.

Ao Sr. Paulo Vieira, empresário e visionário que sempre manteve as portas da P W Brasil Export abertas para a pesquisa.

RESUMO

Diante dos desafios impostos pelo sistema econômico, características dos mercados e exigências dos clientes, as empresas são forçadas a operar com lotes de produção cada vez menores, dificultando a gestão de operações e a otimização dos sistemas produtivos. Desse modo, intensifica-se nos meios corporativos e acadêmicos a busca por abordagens que possibilitem a criação de diferenciais competitivos de mercado, sendo esta a justificativa prática deste trabalho, que propõe uma sistemática integrada para alocação, sequenciamento e balanceamento de lotes em um horizonte de programação em múltiplas linhas de produção em um sistema multiproduto com operadores polivalentes. A sistemática proposta foi dividida em três fases. A primeira fase utiliza um algoritmo genético multiobjetivo com o intuito de determinar a linha de produção em que cada lote será produzido. A segunda fase é responsável pelo sequenciamento dos lotes produtivos e se apoia em uma alteração da regra *Apparent Tardiness Cost* (ATC). Na terceira fase utilizou-se o método *Ranked Positional Weight* (RPW) para balancear a distribuição das tarefas entre os operadores polivalentes de cada linha de produção, respeitando a precedência das tarefas. A sistemática foi aplicada em dados reais do segmento têxtil, aprimorando os indicadores produtivos e de entrega e conferindo maior flexibilidade ao processo frente à demanda sazonal.

Palavras-chave: Sequenciamento. Balanceamento. Algoritmos Genéticos. Otimização Multiobjetivo.

ABSTRACT

Faced with the challenges imposed by the economic system, characteristic of the markets and requirements of the customers, the companies are forced to operate with smaller production batches, making it difficult to manage operations and optimization of the production systems. In this way, the search for improvements that allow the creation of competitive differentials of market is intensified in the corporate and academic circles. This is the practical justification for this work, which proposes an integrated systematics for the allocation, sequencing and balancing of batches in a horizon of programming in multiple production lines in a multiproduct system with multipurpose operators. The systematic proposal was divided into three phases. The first phase uses a multiobjective genetic algorithm with intention to determine the production line in which each batch will be produced. The second phase is responsible for the sequencing of productive batches and is based on a change in the rule Apparent Tardiness Cost (ATC). In the third phase the method Ranked Positional Weight (RPW) was used to balance the distribution of the tasks between the multipurpose operators of each line of production, respecting the precedence of the tasks. The systematics was applied in real data of the textile segment, improving the productive and delivery indicators and giving greater flexibility of the process against the seasonal demand.

Keywords: Allocation. Scheduling. Balancing. Genetic Algorithms. Multiobjective Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Framework para pesquisa de sistema de informação.....	18
Figura 2 – Espaço de decisão x espaço objetivo	23
Figura 3 – Solução com múltiplos objetivos	24
Figura 4 – Relações de dominância	25
Figura 5 – Dominância	26
Figura 6 – Frente de Pareto	26
Figura 7 – Algoritmo evolucionário.....	28
Figura 8 – Representação da distância de aglomeração da solução i	30
Figura 9 – Método NSGAIi	31
Figura 10 – Grafo de precedência.....	44
Figura 11 – Linhas de montagem.....	45
Figura 12 – Classificação ALBP	48
Figura 13 – Classificação ALBP	49
Figura 14 – Método proposto	54
Figura 15 – Cromossomo.....	60
Figura 16 – Processo de otimização	61
Figura 17 – Cruzamento uniforme.....	62
Figura 18 – Fluxograma do primeiro estágio do cálculo da cota	70
Figura 19 – Fluxograma do segundo estágio do cálculo da cota	71
Figura 20 – Fluxograma elaboração gráfico de Gantt	72
Figura 21 – Evolução anual das importações de vestuário em malha	74
Figura 22 – Empregos diretos setor vestuário.....	75
Figura 23 – Evolução da lucratividade na indústria do vestuário	75
Figura 24 – Costura na indústria do vestuário.....	77
Figura 25 – Produção em lotes na costura com opção de terceirização	79
Figura 26 – Horizonte de programação em dias	84
Figura 27 – Média de ocupação por operador da Sistemática x Atual	85
Figura 28 – Desempenho do índice de entrega	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas do método	19
-----------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de Recursos.....	82
Tabela 2 – Lotes por horizonte de programação.....	84
Tabela 3 – Indicadores de entrega.....	878

LISTA DE SIGLAS

- μ GA – *MicroGenetic Algorithm for Multiobjective Optimization*
- AGMO – *Algoritmo Genético Multiobjetivo*
- AHP – *Analytic Hierarchy Process*
- ALB – *Assembly Line Balancing*
- ALBP – *Assembly Line Balancing Problem*
- ATC – *Apparent Tardiness Cost*
- ATC-BS – *Apparent Tardiness Cost with Better Shipment*
- ATCS – *Apparent Tardiness Cost with Setups*
- DJSF – *Distribution Job Shop Flexible*
- EDD – *Earliest Due Date*
- FIFO – *First in First out*
- FJSP – *Flexible Job Shop Problem*
- GALBP – *General Assembly Line Balancing Problem*
- JSP – *Job Shop Problem*
- KWM – *Kilbridge Wester Method*
- LCR – *Largest Candidate Rule*
- LPT – *Longest Processing Time*
- LRM – *Longest Remaining Processing Time*
- LSO – *Longest Subsequent Operation*
- MMD – *Mult Model Deterministic*
- MMS – *Mult Model Stochastic*
- MOPR – *Largest Number of Operations Remaining*
- MS – *Minimum Slack*
- MWKR – *Most Work Remaining*
- NSGA – *Nondominated Sorting Genetic Algorithm*
- PAES – *Pareto Archived Evolution Strategy*
- PCP – *Planejamento e Controle da Produção*
- RPW – *Rank Positional Weight*
- SALBP – *Simply Assembly Line Balancing Problem*
- SMD – *Simple Model Deterministic*

- SMS – *Simple Model Stochastic*
- SPEA – *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*
- SPT – *Shortest Processing Time*
- SWKR – *Smallest Work Remaining*
- WSPT – *Weighted Shortest Processing Time*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 PROBLEMA E OBJETIVOS	15
1.2.1 Problema de Pesquisa	15
1.2.2 Objetivos	16
1.2.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA	16
1.4 MÉTODO DE PESQUISA	18
1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 OTIMIZAÇÃO COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS	21
2.2 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTI OBJETIVOS.....	28
2.2.1 NSGA-II	29
2.3 SEQUENCIAMENTO	32
2.3.1 Regra de Sequenciamento ATC	41
2.4 DISTRIBUIÇÃO EM <i>JOB SHOP</i> FLEXÍVEL.....	42
2.5 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM.....	43
2.5.1 Linhas de Montagem	43
2.5.2 Balanceamento da Linha de Montagem	45
2.5.3 Técnicas de Solução ALBP	50
3 MÉTODO PROPOSTO	52
3.1 ETAPA 1 – OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE LOTES ÀS LINHAS DE PRODUÇÃO.....	55
3.2 ETAPA 2 – SEQUENCIAMENTO DOS LOTES EM CADA LINHA DE PRODUÇÃO.....	64
3.3 ETAPA 3 – BALANCEAMENTO.....	67
3.4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	73
3.4.1 Fase de Costura	76
3.5 RESULTADOS	80
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Percebe-se, nas últimas décadas, que a economia abandonou as características locais e evoluiu para uma economia global e competitiva, com exigências de produtos personalizados de alta qualidade e baixos custos produtivos (LEITÃO, 2009). Tal cenário é influenciado pela evolução das tecnologias de informação e comunicação, exigência de uma elevada variedade de produtos, custos trabalhistas e forças sociais e políticas (DIMITRIS; MICHALIS, 2012).

Ademais, esse novo cenário é igualmente caracterizado por produtos com ciclos de vida mais curtos e pequenos lotes de produção, o que exige processos produtivos capazes de se adaptar rapidamente à demanda por novos modelos, bem como às variações dessa demanda. Em virtude de sua rigidez e baixa capacidade de resposta, os métodos de produção tradicionais têm dificuldade em atender eficientemente às exigências inerentes a esse novo cenário. Assim, tais métodos, baseados em práticas centralizadas, gradativamente têm sido substituídos por abordagens de produção descentralizadas, com benefícios nos prazos de entrega, custos de transporte e agilidade (LEITÃO, 2009). A descentralização das atividades de produção oferece grande potencial para que as indústrias melhorem sua competitividade em dimensões de custo, qualidade, entrega, velocidade, inovação e adaptabilidade às variações de demanda (MOURTZIS et al., 2008).

Para atender à demanda em períodos que a capacidade de produção interna é insuficiente, empresas de diversos segmentos industriais vêm transferindo parte das suas atividades para outras empresas. Nesse modelo de sistema produtivo, tipicamente composto por diversas linhas de produção, os problemas de produção e alocação de agendamento são notadamente complexos, uma vez que se faz necessário distribuir os lotes entre linhas de produção em diferentes localizações geográficas e garantir apropriada utilização dos recursos (WIENDAHL et al., 2007). Esse modelo de sistema produtivo é conhecido na literatura como *Distributed and Flexible Job-Shop Scheduling* (DJFS); nele, o chão de fábrica de cada linha de produção é configurado em *job shop* flexível (DE GIOVANNI; PEZZELLA, 2010; LU et al., 2015; CHANG; LIU, 2015). O *Flexible Job-Shop Problem* (FJSP) é uma extensão do clássico *Job-Shop Problem* (JSP), no qual cada operação pode ser

processada em qualquer conjunto de recursos disponíveis; portanto, o problema consiste em escolher, para cada operação, um recurso habilitado à produção e determinar o momento de início de cada etapa de operação (LEWIS; PAECHTER; ROSSI-DORIA, 2007; BAKER; TRIETSCH, 2009; PINEDO, 2012).

No contexto prático de produção, percebe-se que a flexibilidade necessária para atender à alta variedade de produtos em uma mesma linha de produção é tipicamente obtida através da alocação de operadores capacitados a operar mais de um equipamento (operadores polivalentes) (AZADEH et al., 2010; PARK; BAE; DINH, 2014). Nesse complexo ambiente de produção, os gerentes de produção são incapazes de analisar as decisões necessárias de forma integrada, já que os problemas são usualmente do tipo *NP-hard*, requerendo o emprego de heurísticas para a resolução do problema de forma aproximada (DE GIOVANNI; PEZZELLA, 2010; ZIAEE, 2013, 2017; NADERI; AZAB, 2014; LU et al., 2015).

Esta tese propõe uma sistemática inovadora com vistas à alocação, sequenciamento e balanceamento de lotes em um ambiente de produção multiproduto, com terceirização parcial e operadores polivalentes. Esse ambiente produtivo é observado em diversos segmentos industriais, como confecção e calçados.

1.2 PROBLEMA E OBJETIVOS

1.2.1 Problema de Pesquisa

No atual mercado, as empresas têm sido pressionadas a reavaliar suas estratégias básicas de produção frente a uma demanda por produtos com ciclos de vida mais curtos e pequenos lotes de produção, o que exige o emprego de processos produtivos capazes de se adaptarem rapidamente à produção de novos modelos de produtos, bem como a variações no perfil da demanda. Como resposta, as empresas têm adotado a contratação de empresas terceirizadas para produzir parte da demanda, com o intuito de suportar a variação da sazonalidade. Ao mesmo tempo, têm tornado suas linhas de produção flexíveis com o uso de equipamentos menos especializados, que são manipulados por operadores polivalentes. As decisões nesse ambiente de produção flexível são complexas e correlacionadas, e envolvem, dentre outros: (i) definir a linha de produção em que cada lote será

processado, (i) estipular a ordem de execução dos lotes dentro de cada linha de produção, e (iii) definir o agendamento das tarefas entre operadores e recursos da linha de produção. Nesse contexto, a alocação, sequenciamento e balanceamento dos lotes de produção em um ambiente multiproduto, com operadores polivalentes, no qual é necessário preencher as linhas de produção internas dentro de um horizonte de programação e terceirizar a demanda excedente, apresenta-se pouco explorado e constitui o problema da pesquisa.

1.2.2 Objetivos

1.2.2.1 Objetivo Geral

A pesquisa tem por objetivo propor uma sistemática integrada para alocação, sequenciamento e balanceamento de lotes entre múltiplas linhas de produção, em um sistema multiproduto, com operadores polivalentes.

1.2.2.2 Objetivos Específicos

- a) Propor uma nova regra de sequenciamento baseada na regra ATC, a qual incorpore a priorização do número de clientes e o volume de produtos entregue;
- b) Desenvolver um novo operador genético guiado que permita a criação de indivíduos mais adaptados aos objetivos;
- c) Apresentar uma nova regra de balanceamento inspirada na RPW que considere as características atualmente empregadas no balanceamento para operadores polivalentes;
- d) Avaliar a sistemática proposta em uma base de dados real de produção extraída da indústria têxtil.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

As linhas de montagem foram originalmente concebidas para a produção em fluxo de grandes quantidades de produtos com pouca variedade e baixo custo, dentro do conceito de produção e consumo em massa (GARCIA et al., 2015).

Atualmente, o aumento da concorrência em virtude da abertura de mercado tem forçado as empresas de diversos setores a adaptar suas linhas à criação constante de novos produtos, com ciclos de vida mais curtos e com alta variação na demanda (SILVA; FLORENÇO, 2013; LEITÃO, 2009).

Para atender às novas exigências, as empresas têm transformado suas linhas de produção em linhas de produção flexíveis, com a aplicação de recursos menos especializados e com o uso de operadores polivalentes (TUBINO, 1999; SILVA; FLORENÇO, 2013) e com a terceirização de parte da produção que, além de tornar as linhas mais flexíveis, permite enfrentar períodos com demanda variada (CACHON; HARKER, 2002; QI, 2008; CHEN; LI, 2008; DIMITRIS; MICHALIS, 2012; ZHONG; HUO, 2013; SILVA; FLORENÇO, 2013; REN, 2016). Com base nos argumentos acima expostos, este trabalho encontra justificativa no âmbito prático.

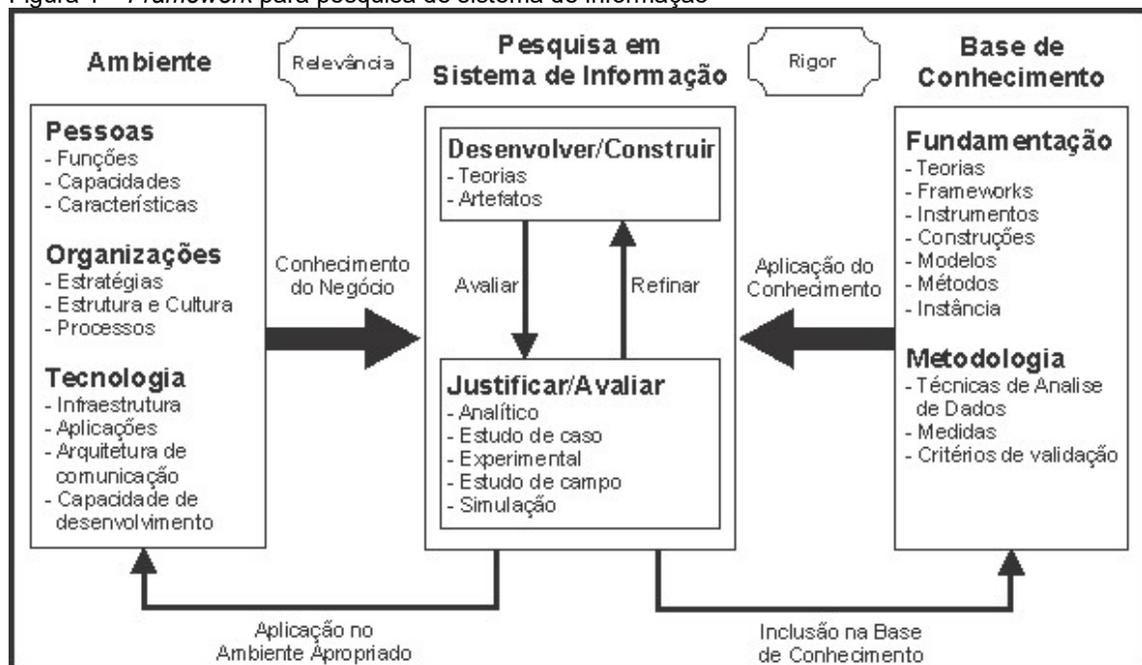
No que diz respeito ao contexto acadêmico, vários pesquisadores têm concentrado seus esforços no estudo deste ambiente de produção, que constitui um problema de alocação entre um conjunto de linhas de produção flexíveis, conhecido na literatura como DJSF (ZHANG; GEN, 2010). Segundo Garey, Johnson e Sethi (1976), os problemas de DJSF são NP-Hard, sendo em muitos casos resolvidos por heurísticas, como em Ziaee (2013), Naderi e Azab (2014), ou por meta-heurísticas, baseadas em algoritmos genéticos (CHAN; CHUNG; CHAN, 2005; CHUNG et al., 2010; DE GIOVANNI; PEZZELLA, 2010; JIA et al., 2007; LIU; CHEN; CHOU, 2015; LU et al., 2015; SUN; CHUNG; CHAN, 2015). O tratamento do problema de forma exata foi proposto por Naderi e Azab (2014); Sun, Chung e Chan (2015), porém somente para pequenas instâncias. Os trabalhos de Lu et al. (2015) e Jia et al. (2007) agregam o tempo de transporte no tempo total de produção. Apesar do trabalho realizado por De Giovanni e Pezzella (2010) mencionar a aplicação da proposta em linhas internas de produção e externas, somente Ziaee (2017) propõe resolver o problema de DFJS com a opção de terceirização, com custo diferente para produção interna e terceirizada, na qual o objetivo é maximizar o lucro. Apesar do trabalho de Ziaee (2017) abordar o problema de distribuição em linhas de produção flexíveis, com a opção de terceirização, e Sun et al. (2015) tratarem o problema de distribuição em lotes, nenhum dos trabalhos investiga em conjunto a alocação de lotes em linhas de produção com a opção de terceirização e operadores polivalentes. A ausência de uma sistemática integrada que incorpore as etapas de distribuir e sequenciar os lotes de produção, de forma a preencher completamente

as linhas de produção interna dentro do horizonte de programação e terceirizar a demanda excedente, justifica a presente tese no contexto acadêmico.

1.4 MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa desta tese é apoiado em aspectos de *Design Science* discutidos em Hevner et al. (2004), os quais propõem um *framework* para a caracterização de aspectos existentes em iniciativas de pesquisa que desenvolvem artefatos tecnológicos, incluindo sistemas computacionais, que é, fundamentalmente, um paradigma para solucionar problemas. Os elementos do *framework* (Figura 1) podem ser analisados como um conjunto de três ciclos de atividades relacionadas. O ciclo de relevância dá início à pesquisa com um contexto de aplicação, definindo parâmetros de aceitação para a validação dos resultados da pesquisa. O ciclo do rigor fornece o conhecimento científico inserido no projeto para assegurar a inovação e, por fim, o ciclo central faz a iteração entre as atividades de construção e validação dos artefatos de *design* e processos (HEVNER et al., 2004).

Figura 1 – *Framework* para pesquisa de sistema de informação



Fonte: Hevner et al. (2004).

Tomando-se como base o *framework* proposto em Hevner et al. (2004), foram definidas 7 (sete) etapas que constituem o método de pesquisa desta proposta. Tais

etapas estão descritas no Quadro 1 e classificadas seguindo aspectos propostos nesse *framework*.

As três primeiras etapas (#1, #2 e #3) visam a identificar as características do ambiente em que serão conduzidas, inicialmente, por intermédio do levantamento e análise de dados. Em seguida, serão tratadas as etapas (#4 e #5), que abordam o estudo da literatura com vistas a conhecer e explorar fundamentações teóricas e metodológicas a serem utilizadas para embasar este trabalho. Na sequência, o foco passa a ser no desenvolvimento da proposta deste trabalho (#6). Por fim, é conduzida a etapa (#7) de avaliação e justificativa dos resultados obtidos com o método proposto. É importante destacar que, embora a execução dessas atividades tenha sido descrita de forma sequencial, algumas das etapas podem ser conduzidas de maneira concomitante.

Quadro 1 – Etapas do método

Etapas do Método		
Aspecto	Descrição da Etapa	
Ambiente	#1	Aplicar entrevistas e questionários com os empresários, gerentes de produção, engenheiros de produção e operadores das indústrias para identificação das técnicas de sequenciamento e balanceamento atualmente utilizadas, mesmo que de forma empírica
	#2	Levantar e analisar os dados de sequenciamento e balanceamento dos lotes de produção
	#3	Comparar os resultados obtidos com a aplicação das diferentes técnicas empíricas utilizadas no sequenciamento e balanceamento na indústria, com o objetivo de determinar as que conduzem a um melhor desempenho produtivo
Base de Conhecimento	#4	Revisar a literatura sobre o tema de alocação, sequenciamento e balanceamento de produção
	#5	Revisar a literatura sobre os métodos heurísticos e exatos de otimização de alocação, sequenciamento e balanceamento de produção
Pesquisa em Sistema de Informação (Desenvolver/Construir)	#6	Executar a modelagem computacional de forma a adequar as técnicas de sequenciamento e balanceamento descritas na literatura, métodos heurísticos e exatos de otimização e as melhores práticas de sequenciamento adotadas na produção das indústrias
Pesquisa em Sistema de Informação (Justificar/Avaliar)	#7	Comparar dados produtivos obtidos antes e depois da aplicação da metodologia e expor a avaliação de especialistas

Por fim, vale destacar que, para efeito de análise do ambiente e avaliação do método, esta proposta tomará como base um cenário de indústrias de vestuário, no qual a problemática descrita pode ser aplicada.

1.5 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

A abordagem proposta está apoiada em limitações que devem ser consideradas no processo de alocação, sequenciamento e balanceamento:

- a) O tempo de transporte e espera dos lotes entre as linhas de produção foi desconsiderado, vez que a sistemática foi aplicada a apenas uma etapa do processo produtivo;
- b) O turno de trabalho não foi considerado neste trabalho. Essa variável pode influenciar no processo de distribuição, já que cada turno pode possuir diferente número de operadores para a mesma linha de produção;
- c) Em empresas que possuem mais de uma linha de produção interna, é comum que os recursos sejam compartilhados entre as linhas de produção, podendo haver o encaminhamento de trabalho para qualquer linha de produção interna com demanda. O compartilhamento de recursos entre as linhas de produção interna não foi considerado neste trabalho; e
- d) Os tempos de execução dos procedimentos são determinísticos, ou seja, não possuem variação em relação ao tempo estimado. Contudo, na indústria de vestuário, as tarefas possuem um elevado grau de interferência humana e o tempo estimado pode sofrer variação durante a execução das operações (tempos estocásticos).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma breve revisão referente aos conceitos e técnicas aplicados nos passos metodológicos desta tese.

2.1 OTIMIZAÇÃO COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS

Otimizar significa tornar algo ótimo ou ideal. Em outras palavras, extrair o melhor rendimento possível empregando técnicas para selecionar as melhores alternativas a fim de se chegar aos objetivos (DEB, 2009). Refere-se a encontrar uma ou mais soluções viáveis que corresponda a valores extremos, máximos ou mínimos, de um ou mais objetivos. Quando o problema possui apenas um único objetivo, o processo de otimização está centrado em encontrar a melhor configuração das variáveis que respeitem as restrições, de forma a obter o melhor valor para uma função. No entanto, na prática, problemas de otimização envolvem múltiplos objetivos, ou seja, possuem mais de uma função objetivo que, na maioria das vezes, são conflitantes (isto é, a melhora de um desagrada os demais) (SRINIVAS; DEB, 1994; ZITZLER; THIELE, 1999).

Em problemas de otimização com múltiplos objetivos não existe uma solução que obtenha o melhor resultado para todos, não permitindo a determinação de uma única solução ótima, como na otimização com um objetivo (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Nesse processo, obtém-se um conjunto de soluções, no qual nenhuma solução é melhor que a outra, necessitando de informações adicionais para o processo de tomada de decisão. Uma descrição detalhada do processo de otimização com múltiplos objetivos, conceitos e definições pode ser analisada na literatura em Zitzler, Thiele (1999), em Coello, Lamont e Veldhuizen (2007) e Deb (2009). A formulação de um problema com múltiplos objetivos conforme Deb (2009) é dada a seguir:

Maximizar / Minimizar

$$(1) \quad f_{im}(y), \quad im = 1, 2, 3, \dots, MF$$

Sujeito a:

$$(2) \quad a_{ib}(y) \geq 0, \quad ib = 1, 2, 3, \dots, MB$$

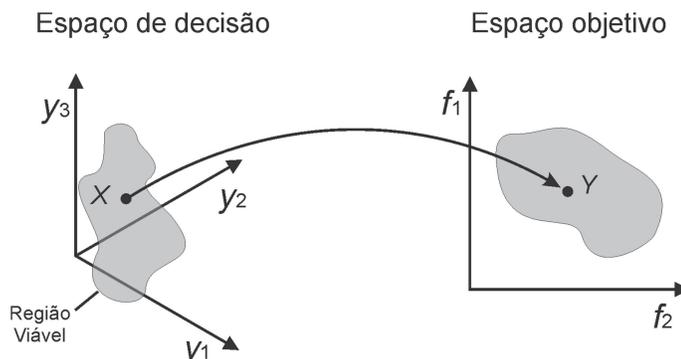
$$(3) \quad c_{ic}(y) = 0, \quad ic = 1, 2, 3, \dots, MC$$

$$(4) \quad y_{iy}^{(inf)} \leq y_{iy} \leq y_{iy}^{(sup)}, \quad iy = 1, 2, 3, \dots, MY$$

- Existem MF funções objetivos $f(y) = (f_1(y), f_2(y), \dots, f_{MF}(y))$, e cada função pode ser de maximizar ou minimizar. Cada função objetivo serve de guia, avaliando os resultados obtidos durante o processo de otimização, no qual as variáveis de decisão $y = (y_1, y_2, \dots, y_{MY})$ têm seus valores alterados.
- (3) e (2) são restrições de comportamento representadas por funções de igualdade ou desigualdade, que delimitam situações inadequadas para a solução do problema.
- (4) São as restrições laterais que delimitam diretamente as MY variáveis de decisão. Obrigam a que cada variável de decisão y_{iy} assumam um valor entre um limite inferior, $y_{iy}^{(inf)}$, e um limite superior, $y_{iy}^{(sup)}$.

Qualquer solução que satisfaça a todas as restrições é conhecida como solução viável e se encontra dentro de uma região chamada região viável. O melhor valor, ou valor ótimo da função objetivo, encontra-se no ponto ótimo, que é um conjunto de pontos formado pelas variáveis de decisão que, juntos, formam o extremo da função objetivo e devem respeitar as restrições. Uma diferença entre problemas de otimização com um objetivo e com múltiplos objetivos é que a função objetivo constitui um conjunto multidimensional de soluções, no qual cada conjunto de variáveis de decisão, que forma um ponto viável, é mapeado em um ponto no espaço objetivo, visualizado na Figura 2. Dessa maneira, é possível ter diversos pontos mapeados no espaço de decisão apontando para diferentes pontos no espaço objetivo.

Figura 2 – Espaço de decisão x espaço objetivo



Fonte: adaptada de Deb (2009).

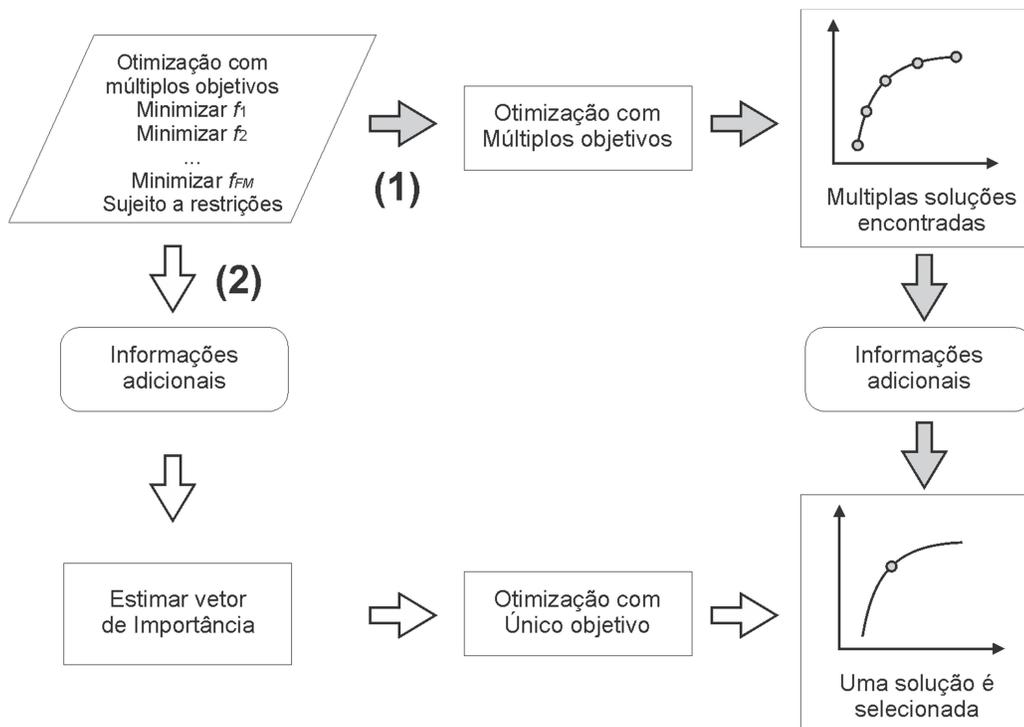
Erroneamente, pode-se pensar que, na otimização com múltiplos objetivos, a tarefa seja buscar uma ótima solução para cada função objetivo. Entretanto, como mais de uma função objetivo deve ser avaliada simultaneamente, a otimização não pode ser aplicada a somente um objetivo, vez que os outros também são importantes. Segundo Deb (2009), existem duas abordagens para solucionar problemas de otimização com múltiplos objetivos, conforme ilustrado na Figura 3:

1. Buscar múltiplas soluções com diferentes valores para os objetivos e, com o conjunto encontrado, utilizar informações adicionais para escolher uma dentre elas, conforme a Figura 3-1;
2. Durante o processo de busca, utilizar um peso para cada objetivo. Isso transforma o processo de busca com múltiplos objetivos em um processo de busca com um simples objetivo, conforme a Figura 3-2.

A abordagem 1 é mais metódica, prática e menos subjetiva, porém, se há um conhecimento confiável o bastante para estabelecer os pesos, a abordagem 2 pode ser a mais adequada. Utilizar pesos para combinar vários objetivos em uma única função objetivo durante o processo de otimização têm a vantagem de produzir uma única solução; todavia, definir os pesos para cada objetivo requer um conhecimento detalhado, muitas vezes, não disponível (ZITZLER; THIELE, 1999). Outro problema é que os métodos de otimização com múltiplos objetivos são, geralmente, muito

sensíveis a pequenas alterações nos pesos da função objetivo (HORN; NAFPLIOTIS; GOLDBERG, 1994).

Figura 3 – Solução com múltiplos objetivos



Fonte: adaptada de Deb (2009).

É inadequado conceder uma solução ótima para um problema que trate simultaneamente objetivos conflitantes, assim como ocorre na otimização com um único objetivo, pois na otimização com múltiplos objetivos não existe uma única solução ótima e sim um conjunto de soluções, no qual todos os objetivos são simultaneamente considerados. Dessa forma, é necessário estabelecer a ordenação das soluções obtidas, considerando cada um dos objetivos com a utilização do conceito de dominância (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Segundo esse conceito, uma solução $y^{(1)}$ domina outra solução $y^{(2)}$ se ambas as condições, 1 e 2, sejam satisfeitas (DEB, 2009; LU et al., 2013):

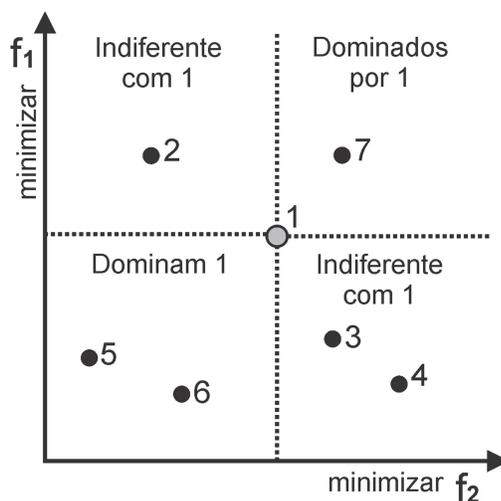
1. A solução $y^{(1)}$ é melhor ou igual a $y^{(2)}$ em todos os objetivos;
2. A solução $y^{(1)}$ é estritamente melhor que $y^{(2)}$ em pelo menos um objetivo.

Caso qualquer uma das condições supracitadas seja violada, a solução $y^{(1)}$ não domina a solução $y^{(2)}$. Se $y^{(1)}$ domina a solução $y^{(2)}$ (ou matematicamente $y^{(1)} \prec y^{(2)}$), esse fato também pode ser definido como:

- $y^{(2)}$ é dominado por $y^{(1)}$;
- $y^{(1)}$ não é dominado por $y^{(2)}$;
- $y^{(1)}$ é melhor ou igual a $y^{(2)}$.

Ao considerar os objetivos de minimização e aplicar os conceitos de dominância apresentados na Figura 4, é possível constatar que a solução “7” é dominada pela solução “1” em ambos os objetivos, que as soluções “5” e “6” dominam a solução “1” em ambos os objetivos, e que as soluções “2”, “3” e “4” não dominam, tampouco são dominados pela solução “1”, pois a solução “1” apresenta melhor resultado em pelo menos um dos objetivos.

Figura 4 – Relações de dominância

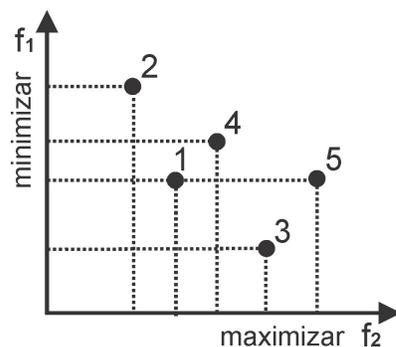


Fonte: adaptada de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

Considere dois objetivos, nos quais o objetivo 1 é de minimizar (f_1) e o objetivo 2 é de maximizar (f_2), conforme apresentado na Figura 5. Ao analisar as soluções “1” e “2”, aplicando os conceitos de dominância, é possível verificar que a solução “1” é melhor do que a solução “2” para o objetivo 1 e para o objetivo 2. Dessa forma, é possível afirmar que a solução “1” domina a solução “2”. Comparando as soluções “1” e “5”, é possível verificar que a solução “5” é melhor do

que a solução “1” para o objetivo 2 e igual para o objetivo 1, o que permite afirmar que, de acordo com os conceitos de dominância apresentados, a solução “5” domina a solução “1” (DEB, 2009).

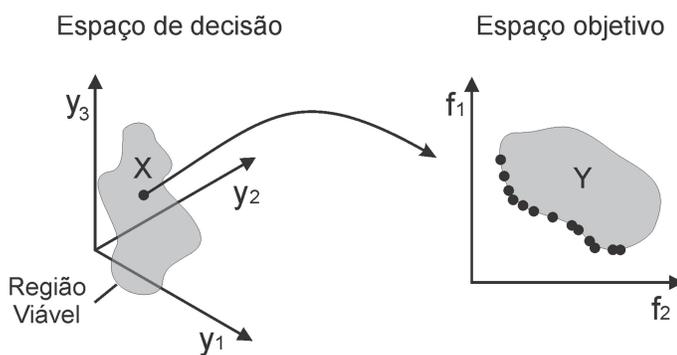
Figura 5 – Dominância



Fonte: adaptada de Deb (2009).

Ao conjunto de soluções não dominadas do espaço objetivo mostrado na Figura 6, dá-se o nome de frente de Pareto (DEB, 2009). Na otimização de um único objetivo a finalidade é encontrar a solução (ou soluções) que forneça o mínimo (ou máximo) do valor da função objetivo, porém, quando são considerados vários objetivos na otimização, não existe uma única solução que seja ótima com respeito a todos os objetivos, ocorrendo sempre uma melhora em pelo menos um dos objetivos e um sacrifício em pelo menos um dos outros; isto é, para cada solução desse conjunto não há outra solução que seja melhor em todos os objetivos.

Figura 6 – Frente de Pareto



Fonte: adaptada de Deb (2009).

A existência de um grande número de alternativas pertencentes à fronteira Pareto torna complexa a escolha. Entretanto, apesar da importância e da dificuldade dessa decisão, os esforços nessa área têm se concentrado, principalmente, na busca pela fronteira ótima de Pareto, em detrimento ao acoplamento de informações quanto à preferência do decisor dos algoritmos de busca. Esse acoplamento pode ser implementado de três formas:

- a) Decisão a priori – O decisor é consultado uma única vez, antes do início do processo de otimização e a informação obtida quanto aos seus interesses é usada para guiar a busca pela solução favorita pertencente à fronteira Pareto;
- b) Interativa ou progressiva – O decisor é consultado várias vezes durante o processo de otimização. Desse modo, ele pode definir suas preferências tendo disponível a informação da interação corrente quanto às possíveis soluções. Sua preferência guia a busca nas próximas iterações, até que nova consulta seja realizada. O processo de decisão progressiva somente é interrompido quando o decisor estiver totalmente satisfeito com sua escolha;
- c) Decisão a posteriori – Inicia-se com a execução de uma busca multiobjetivo. O decisor é consultado apenas depois que uma aproximação discreta satisfatória da fronteira de Pareto for encontrada.

A abordagem a posteriori possui a vantagem de o decisor poder analisar todas as soluções ótimas disponíveis antes de fazer sua escolha. Caso seus interesses se alterarem, não é necessário executar o algoritmo de otimização novamente. Além disso, geralmente, é mais fácil incluir novos critérios na análise realizada a posteriori do que a priori, ou progressivamente. Por outro lado, essa abordagem, comumente, exige maior tempo de processamento do que as outras, uma vez que a busca por uma aproximação da fronteira de Pareto tende a exigir maior esforço computacional do que a busca por um único ponto ótimo (DEB, 2009).

A dificuldade associada à resolução de problemas de otimização de forma exata, naturalmente combinatória, exige o desenvolvimento de técnicas heurísticas que procuram obter boas soluções a um custo computacional razoável, sem garantir que as soluções sejam as melhores. As heurísticas surgiram para resolver certos tipos específicos de problemas, não sendo flexíveis o bastante para aplicação em

um conjunto de diferentes problemas. As meta-heurísticas surgiram com uma proposta de heurísticas que podem ser aplicadas à solução de diferentes problemas de otimização (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). Dentre as meta-heurísticas, os algoritmos evolucionários são naturalmente adaptados para trabalhar com múltiplos objetivos, isso em razão de encontrar múltiplas soluções em uma única evolução por intermédio da melhora de uma população de soluções, além de não precisar de informações adicionais e por possibilitar escapar dos ótimos locais durante o processo de otimização (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

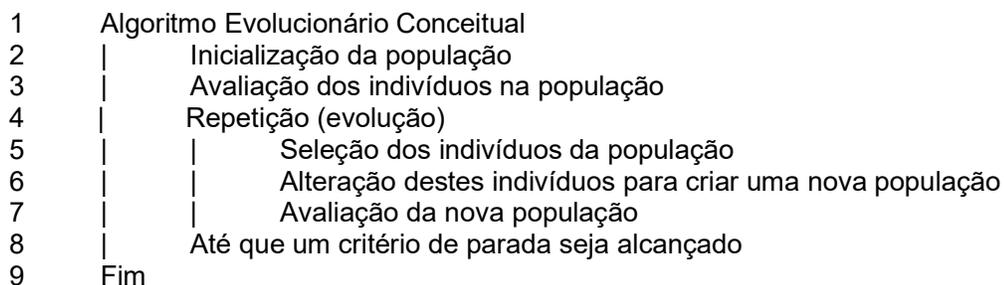
2.2 ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVOS

Algoritmos evolucionários são técnicas meta-heurísticas de busca e otimização, largamente aplicáveis, inspiradas nos mecanismos da evolução natural (DEB, 2009). A ideia é a evolução de uma população de estruturas computacionais, de tal modo que melhore a adequação média dos indivíduos que formam essa população em relação ao ambiente em que ela está submetida. Os modelos de algoritmos evolucionários com múltiplos objetivos são, usualmente, classificados em dois grupos (DEB, 2009):

- a) Não elitistas: aqueles que não utilizam nenhuma forma de elitismo nas suas iterações;
- b) Elitistas: modelos que empregam alguma forma de elitismo.

No que diz respeito à estrutura do código do algoritmo básico da computação evolucionária, esta se encontra descrita na Figura 7.

Figura 7 – Algoritmo evolucionário



Fonte: adaptada de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

Os algoritmos evolucionários se destacam entre as meta-heurísticas para otimização com múltiplos objetivos, em virtude de suas características populacionais que são mais adequadas do que outras buscas cegas (FONSECA; FLEMING, 1995). Há grande variedade de algoritmos evolucionários que trabalham com múltiplos objetivos na literatura, dentre os quais se destacam: *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA); *Niched Pareto Genetic Algorithm* (NPGA); *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA); *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2); *Pareto Archived Evolution Strategy* (PAES); *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II); e *MicroGenetic Algorithm for Multiobjective Optimization* (μ GA). Os autores Coello, Lamont e Veldhuizen (2007) e Deb (2009) aprofundam informações específicas sobre cada um deles.

Diversos estudos, dentre os quais Zitzler e Thiele (1999); Srinivas e Deb (1994); Dias e Vasconcelos (2002); Gen e Lin (2014), compararam os algoritmos evolucionários multiobjetivos citados anteriormente. Dentre eles, o que obteve o melhor resultado foi o algoritmo de classificação genética não dominada (NSGA-II), o qual será utilizado no processo de otimização da proposta. Dessa maneira, a seguir, melhor apresenta-se o algoritmo NSGA-II.

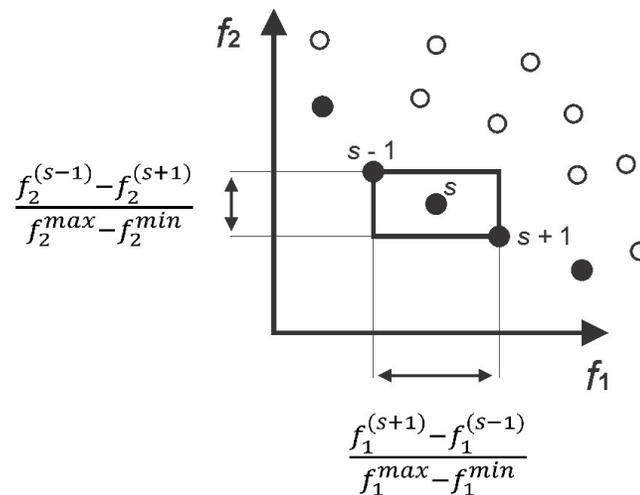
2.2.1 NSGA-II

O algoritmo NSGA-II é uma heurística construtiva de busca elitista, que faz a preservação de soluções dominantes por meio de várias gerações (DEB, 2009). O processo se inicia a partir de uma população (Z) com s indivíduos (pais) obtidos aleatoriamente, ou mediante uma heurística construtiva. As gerações seguintes são obtidas a partir de operadores de modificação genética de mutação, seleção e recombinação. O algoritmo tem como finalidade encontrar um conjunto de pontos próximos à frente de Pareto e se manter o mais diversificado possível. A distância de aglomeração (*crowding distance*) permite qualificar o espaço ao redor de uma solução, pois é fundamental que os indivíduos da população estejam relativamente espaçados dentro da fronteira de Pareto, permitindo maior variedade do conjunto de soluções e, conseqüentemente, conduzindo com mais rapidez ao encontro de indivíduos com maior qualidade de solução (DEB et al., 2002). O cálculo da distância aglomeração da solução s é dado por u_s conforme definido na Equação 1.

$$u_s = \frac{f_1^{(s+1)} - f_1^{(s-1)}}{f_1^{max} - f_1^{min}} + \frac{f_2^{(s-1)} - f_2^{(s+1)}}{f_2^{max} - f_2^{min}} \quad (1)$$

Na Equação 1, s representa a solução analisada e f_1^{max} , f_1^{min} , f_2^{max} e f_2^{min} representam os valores máximos e mínimos sobre o espaço da solução para as funções objetivo f_1 e f_2 . Essa equação representa metade do perímetro do retângulo da Figura 8; sendo assim, pode-se afirmar que, para um conjunto de soluções, a solução que introduz o maior nível de diversidade é aquela com maior distância de aglomeração e representa a medida da distância ao redor da solução em questão que não é ocupada por nenhuma outra solução.

Figura 8 – Representação da distância de aglomeração da solução i

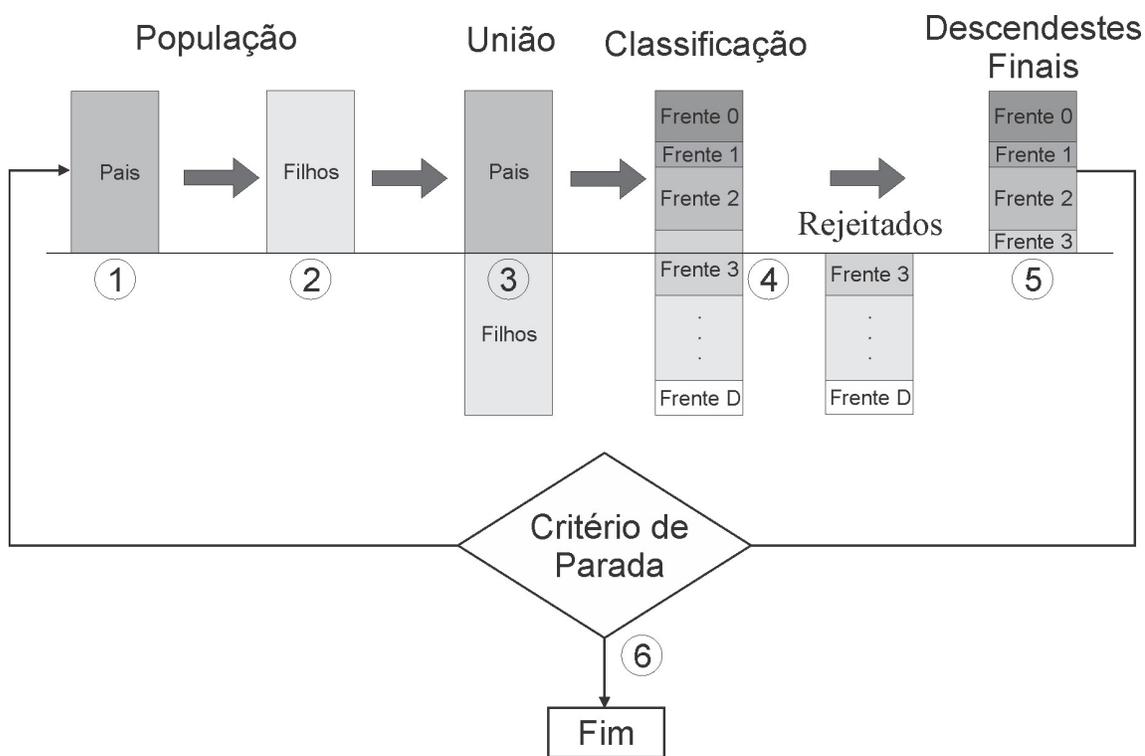


Fonte: adaptada de Deb et al. (2002).

O esquema do NSGA-II pode ser descrito conforme Figura 9, na qual a população inicial é criada de forma aleatória. A partir dessa população cria-se, por meio de operadores genéticos, uma segunda população de filhos, que é combinada com a população de pais inicial e, em seguida, classificada de acordo com o grau de dominância da frente de Pareto. Dessa forma, a primeira frente tem o grau de dominância 0, a segunda frente o grau 1 e assim por diante. O próximo passo é limitar o tamanho da população, criando um corte em determinado ponto em uma das frentes de Pareto. Para que esse procedimento ocorra, a ordenação dos

indivíduos dentro das frentes deve ser feita conforme a maior distância de aglomeração, forçando a sobrevivência de indivíduos que estejam bem distribuídos pela frente de Pareto. O procedimento se repete até que os critérios estabelecidos de parada sejam satisfeitos. Desse modo, os descendentes finais são resultados de uma busca elitista pela frente de Pareto com menor grau de dominância e da ordenação dos indivíduos da última frente pela maior distância de aglomeração entre os indivíduos. A seguir é descrito o pseudocódigo do NSGA-II (DEB et al., 2002).

Figura 9 – Método NSGAI



Fonte: adaptada de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

1. Gerar uma população Z de tamanho N .
2. Usando a seleção, recombinação e mutação, gerar uma população de descendentes do mesmo tamanho de Z .
3. Reunir pais e filhos em um conjunto de tamanho $2N$.
4. Classificá-los em frentes de dominância e avaliar as distâncias de aglomeração (*crowding distance*) em cada frente.

5. Determinar os descendentes finais selecionando as frentes com melhor grau de dominância. Se o limite de tamanho N é superado, eliminar as soluções com menor distância de aglomeração na última frente selecionada.
6. Se o critério de convergência é atingido, fim do processo. Caso contrário, retornar ao passo 3.

Um conjunto de soluções pertencentes à primeira frente de Pareto é obtido como resultado do algoritmo NSGA-II. A partir desse conjunto, há a necessidade de se optar por uma dentre as possíveis soluções que serão aplicadas na distribuição das tarefas como resultado final do algoritmo, cuja decisão fica a cargo do especialista.

2.3 SEQUENCIAMENTO

O objetivo do sequenciamento é fazer uso eficiente dos recursos de produção e assegurar a rápida execução das tarefas de forma a realizar entregas nos prazos acordados (PINEDO, 2012). É possível categorizar os principais modelos de programação, especificando as configurações dos recursos e da natureza das tarefas. Dessa maneira, um problema de sequenciamento pode conter uma ou várias máquinas. Se o problema contém somente uma máquina, as tarefas são relacionadas a uma única fase. Caso o problema contenha vários tipos de máquinas, ele, geralmente, envolve tarefas com múltiplas fases. Em ambos os casos, as máquinas podem estar distribuídas em quantidades unitárias ou em paralelo.

Além disso, se o conjunto de tarefas disponíveis para a programação não se altera ao longo do tempo, o sistema é chamado de estático, em contraste com os casos em que aparecem novos trabalhos ao longo do tempo, em que o sistema é chamado de dinâmico. Tradicionalmente, os modelos estáticos são mais facilmente resolvidos do que os modelos dinâmicos e têm sido estudados mais extensivamente. Embora os modelos dinâmicos estejam mais próximos da aplicação prática, modelos estáticos frequentemente capturam a essência dos sistemas dinâmicos e a análise desses problemas revela informações valiosas e bons princípios heurísticos, que são úteis em situações dinâmicas. Finalmente, quando se presumem condições de certeza, o modelo é chamado de determinista. Por outro lado, quando se reconhece

a incerteza utilizando distribuições de probabilidade explícitas, o modelo é chamado estocástico (BAKER; TRIETSCH, 2009).

Todo o sequenciamento considera o número de postos de trabalho e de máquinas como finitos. O número de postos de trabalho é designado por n e o número de máquinas por m . Geralmente, o índice j refere-se a um posto de trabalho, enquanto i refere-se a uma máquina. Se um trabalho exige uma série de etapas de processamento ou operações, o par (i, j) refere-se à etapa de processamento ou operação da tarefa j na máquina i . As seguintes informações estão associadas à tarefa j (PINEDO, 2012): (i) Tempo de processamento (p_{ij}). Representa o tempo de processamento da tarefa j na máquina i . O i pode ser omitido se o tempo de processamento da tarefa j não depende do equipamento. Se o trabalho for processado em apenas uma máquina, j pode ser omitido; (ii) Data de liberação (r_j). Representa a data em que a tarefa j estará disponível para o sistema; (iii) Data de entrega (d_j). Representa a data de entrega do trabalho j (isto é, a data em que o trabalho está prometido ao cliente). O término do trabalho após a sua data de entrega é permitido, mas com uma penalidade; e (iv) Peso (w_j). O peso da tarefa j representa sua prioridade ou importância da tarefa j em relação às outras tarefas.

Um problema de sequenciamento pode ser descrito por um trio de caracteres do tipo $\alpha|\beta|\gamma$ (GRAHAM et al., 1979; PINEDO, 2012; BRUCKER, 2007). Segundo os autores a variável α descreve o ambiente das máquinas e contém apenas uma entrada. A variável β fornece detalhes das características de processamento e restrições e pode conter nenhuma, uma ou múltiplas entradas. Já γ descreve o objetivo que muitas vezes contém uma única entrada.

Os ambientes de máquina possíveis, especificados por α , são:

- a) Uma máquina (1): o caso de uma única máquina é o mais simples de todos os ambientes de máquina possível;
- b) Máquinas idênticas em paralelo. Se uma tarefa j exige uma única operação, que pode ser processada em qualquer uma das m máquinas. Se a tarefa j não pode ser processada em qualquer máquina, mas em um subconjunto específico M_j , então a entrada M_j aparece no campo β ;
- c) Máquinas em paralelo com diferentes velocidades. Há m máquinas em paralelo que realizam o trabalho da mesma forma, variando somente a velocidade, que é denotada por x_i para a máquina i . O tempo p_{ij} da tarefa j na

máquina i é igual a $\frac{p_j}{x_i}$, assumindo que ela possa ser processada pela máquina i ;

- d) Máquinas não relacionadas. Esse ambiente é uma generalização do anterior. Existem m máquinas diferentes em paralelo. A máquina i pode processar a tarefa j com uma velocidade x_{ij} . O tempo p_{ij} que a tarefa j gasta na máquina i é igual a $\frac{p_j}{x_{ij}}$. Se as velocidades das máquinas são independentes da tarefa, isto é, $x_{ij} = x_i \forall \{i, j\}$, então o ambiente se torna idêntico ao anterior;
- e) *Flow shop*. Existem m máquinas em série. Cada tarefa tem que ser processada por cada uma das m máquinas. Todas as tarefas têm o mesmo roteiro, dito de outro modo, devem ser processadas primeiro pela máquina 1, depois pela máquina 2, e assim por diante. Após o término em uma máquina uma tarefa entra na fila para a próxima máquina. Normalmente, todas as filas operam com *first in first out* (FIFO), isto é, uma tarefa não pode passar outra na fila. Se o FIFO é adotado, o *flow shop* é referido como *flow shop* com permutação, e o campo β deve incluir a entrada *prmu*, que é apresentada abaixo;
- f) *Flexible Flow shop*. É uma generalização dos ambientes *flow shop* e máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série, existem s estágios em série com um número de máquinas em paralelo em cada estágio. Cada tarefa deve ser processada primeiro no estágio 1, depois no estágio 2, e assim por diante. Um estágio funciona como um banco de máquinas paralelas: em cada estágio, uma tarefa j requer apenas uma máquina e, normalmente, qualquer máquina pode processar qualquer tarefa. As filas entre os vários estágios também operam, em geral, com a estratégia FIFO;
- g) *Open shop*. Existem m máquinas. Cada tarefa tem que ser processada em cada uma das m máquinas. No entanto, alguns dos tempos de processamento podem ser zero. Não há restrições quanto ao roteiro de cada tarefa pelo ambiente de máquinas. É possível determinar um roteiro para cada tarefa e tarefas diferentes podem ter roteiros diferentes;
- h) *Job shop*. Num *job shop* com m máquinas, cada tarefa tem seu próprio roteiro. Uma distinção é feita entre *job shops*, no qual cada tarefa visita qualquer máquina no máximo uma vez e *job shops*, em que uma tarefa pode visitar uma máquina mais de uma vez;

- i) *Flexible Job shop*. É uma generalização do *Job Shop* e do ambiente de máquinas paralelas. Em vez de m máquinas em série, existem centros de produção c e em cada centro de trabalho existe um número de máquinas idênticas em paralelo.

As restrições especificadas no campo β podem incluir múltiplas entradas. Algumas dessas entradas possíveis são:

- a) Data de disponibilidade. Se r_j estiver presente em β , a tarefa j não pode iniciar seu processamento antes da data de disponibilidade r_j . Se r_j não aparece em β , o processamento da tarefa j pode começar a qualquer momento. Em contraste com datas de disponibilidade, datas de entrega não são especificadas nesse campo. O tipo de função objetivo fornece indicação suficiente se existem datas de entrega ou não;
- b) Preempções. Elas sugerem que não é necessário manter uma tarefa em uma máquina até o término, podendo ocorrer a interrupção do processamento de uma tarefa a qualquer instante e colocar uma tarefa diferente na máquina. A quantidade de tempo de processamento que uma tarefa interrompida já recebeu não é perdida. Quando uma tarefa interrompida volta à máquina (ou a outra máquina no caso de máquinas paralelas), ela somente precisa da máquina para o tempo de processamento restante;
- c) Tempos de preparação dependentes da sequência. S_{jk} Representa o tempo de preparação dependente da sequência entre as tarefas j e k . Nesse caso, S_{0k} denota o tempo de preparação para a tarefa k se a tarefa k é a primeira na sequência e S_{j0} denota o tempo de limpeza após a tarefa j se for a última na sequência. Se o tempo de preparação entre as tarefas j e k depende da máquina, o subíndice i é incluído, isto é, S_{ijk} . Se S_{ijk} não aparece em β , todos os tempos de preparação são assumidos zero ou independentes da sequência, podendo ser, simplesmente, adicionados aos tempos de processamento;
- d) Famílias de tarefas. As n tarefas pertencem, nesse caso, a F diferentes famílias. Tarefas da mesma família podem ter tempos de processamento diferentes, mas elas podem ser processadas numa máquina, uma após a

outra, sem necessidade de qualquer tempo de *setup*. No entanto, se a máquina mudar de uma família para outra, ou seja, da família g para a família h , é necessário um tempo de *setup*. Se esse tempo de preparação depende de ambas as famílias g e h e é dependente da sequência, é definida por S_{gh} . Se esse tempo de preparação depende apenas da família que iniciou, isto é, família h , usa-se S_h . Se não depender de outra família, é simplesmente dado por S ;

- e) Processamento em lote. Uma máquina pode ser capaz de processar um número de tarefas b simultaneamente, isto é, ela pode processar um lote de até b tarefas ao mesmo tempo. Se $b = 1$, então o problema reduz-se a um ambiente de programação convencional. Outro caso especial que é de interesse é $b = \infty$, ou seja, não há limite para o número de postos de trabalho. Nesse caso, a máquina pode manipular uma tarefa a qualquer momento;
- f) Quebras. A quebra de máquinas sugere que máquinas não estão sempre disponíveis. Os períodos em que uma máquina não está disponível são assumidos fixos (por exemplo, devido a turnos ou manutenções). Se há máquinas idênticas em paralelo, o número de máquinas disponíveis é uma função do tempo $m(t)$;
- g) Restrições de elegibilidade. Acontece quando nem todas as m máquinas são capazes de processar a tarefa j . O conjunto M_j denota o conjunto de máquinas capazes de processar a tarefa j ;
- h) Permutação. Uma restrição que pode ser aplicada no ambiente de *flow shop* assume que as filas na entrada de cada máquina operam conforme a política FIFO. Isso quer dizer que a ordem (ou permutação) em que as tarefas passam pela primeira máquina é mantida por intermédio do sistema;
- i) Bloqueio. O bloqueio é um fenômeno que ocorre em *flow shop*. Se um *flow shop* tem um buffer limitado entre duas máquinas sucessivas, pode acontecer que, quando um buffer estiver cheio, a máquina anterior não poderá liberar a tarefa terminada. Esse fenômeno se chama bloqueio. Nesse caso, a tarefa terminada precisa permanecer na máquina anterior, evitando ou bloqueando a máquina de processar outras tarefas;
- j) Sem espera. A restrição sem-espera é outro fenômeno que pode ocorrer em *flow shop*. Tarefas não podem esperar entre duas máquinas sucessivas. Isso

significa que o tempo de início de uma tarefa pode ser atrasado para garantir que a tarefa possa atravessar o *flow shop* sem precisar esperar por nenhuma máquina. Um exemplo de uma operação é uma linha de produção, na qual determinada peça de metal não pode esperar pela próxima etapa porque ela esfriaria.

- k) Recirculação. A recirculação pode ocorrer em *job shop*, quando uma tarefa pode visitar uma máquina mais de uma vez.

Outras entradas de β são autoexplicativas. Por exemplo, $p_j = p$ indica que todos os tempos de processamento são iguais, e $d_j = d$ indica que todas as datas de entrega são iguais. Como descrito anteriormente, datas de entrega, ao contrário das datas de disponibilidade, não são normalmente explicitadas em β ; o tipo da função objetivo nos fornece indicação suficiente se as tarefas têm data de entrega ou não.

O objetivo a ser minimizado é sempre uma função dos tempos de término das tarefas que, nitidamente, dependem do sequenciamento, ou também pode ser uma função das datas de entrega. O tempo de término da operação da tarefa j na máquina i é dado por c_{ij} . O tempo em que a tarefa j sai do sistema (o tempo de término na última máquina onde ela requer processamento) é denotado por c_j . O atraso de uma tarefa j é definido conforme Equação 2.

$$L_j = C_j - d_j \quad (2)$$

Nesse caso, assume um valor positivo quando a tarefa j é terminada atrasada e negativo quando é completada adiantada. A diferença entre o atraso e o adiantamento reside no fato de que o atraso nunca será negativo. A pena unitária da tarefa j é definida como na Equação 3.

$$U_j = \begin{cases} 1 & \text{se } C_j > d_j \\ 0 & \text{se contrário} \end{cases} \quad (3)$$

A seguir, são descritos alguns exemplos de possíveis funções objetivo a serem minimizadas no contexto de sequenciamento, segundo Pinedo (2012):

- a) *Makespan* (C_{max}). Definido como $\max(C_1, \dots, C_n)$, é equivalente ao término da última tarefa a sair do sistema. Um *makespan* mínimo, geralmente, indica uma alta utilização das máquinas;

- b) *Lateness* (L_{max}). É definido como $\max(L_1, \dots, L_n)$. Mede a pior violação das datas de entrega;
- c) Tempo de término total ponderado ($\sum w_j \cdot c_j$). A soma dos tempos ponderados de término das n tarefas, utilizando a prioridade w_j como fator de ponderação, oferece uma indicação do custo total do sequenciamento. A soma dos tempos de término é frequentemente referida na literatura como tempo de fluxo (*flow time*). O tempo de término total ponderado é chamado de tempo de fluxo ponderado;
- d) Tempo de término total ponderado descontado ($\sum (1 - e^{-rc_j})$). Essa é uma função de custo mais geral que a anterior, na qual os custos são descontados a uma taxa de r , $0 < r < 1$, por unidade de tempo. Nesse caso, se a tarefa j não termina até o tempo t , um custo adicional $w_j r e^{-rt} dt$ é adicionado durante o período $[t, t + dt]$. Se a tarefa j termina no tempo t , o custo total do período $[0, t]$ é $w_j(1 - e^{-rt})$. O valor de r comumente é próximo a 0, como 0,1 (ou 10%);
- e) Atraso total ponderado ($\sum w_j \cdot T_j$). Também é uma função de custo, mais geral que o tempo de término total ponderado;
- f) Número ponderado de tarefas atrasadas ($\sum w_j \cdot U_j$). O número ponderado de tarefas atrasadas não somente é uma métrica de interesse acadêmico, mas também é um objetivo frequente na vida real.

Segundo Pinedo (2012), é possível classificar o sequenciamento em três classes distintas:

- a) Sem espera – Quando as operações são distribuídas entre as máquinas, de forma que nenhuma fique, em momento algum, esperando sem trabalho o término de outra operação;
- b) Ativo – Quando não existe nenhuma operação que possa ser deslocada para a esquerda sem que haja atraso em qualquer outra operação;
- c) Semiativo – Quando existe, pelo menos, uma operação que pode ser movida para uma posição a direita de sua localização, sem que atrase nenhuma outra operação.

Diversos trabalhos reportados na literatura têm se dedicado a encontrar algoritmos com tempo polinomial para resolução de problemas de sequenciamento, porém muitos problemas não possuem um algoritmo polinomial. Esses problemas são conhecidos como NP-Hard, exigindo uma prova matemática para comprovar sua dificuldade (PINEDO, 2012).

Soluções com técnicas inteiras ou heurísticas podem ser desenvolvidas, todavia, sua aplicação se torna difícil em virtude da natureza combinatória do problema, que cresce à medida que novos produtos e rotas são criados (e os dados de movimentação da produção são atualizados). Uma alternativa para esses casos é a aplicação de uma heurística baseada em construção que tem complexidade linear, frequentemente referida como regras de sequenciamento. Tais regras atribuem uma prioridade aos lotes em espera na fila de acordo com uma combinação de características e parâmetros para, em seguida, selecionar o lote com a maior prioridade. Há muitas regras que priorizam os lotes segundo critérios diferentes; embora várias regras específicas tenham sido desenvolvidas, não existe uma regra unânime (EL-BOURI, 2012).

A principal vantagem na utilização de regras de despacho em ambientes dinâmicos é a capacidade para tomar suas decisões de sequenciamento com base em dados locais. Isso significa que novos postos de trabalho podem ser sequenciados em tempo real, localmente e sem a necessidade de rever ou estabelecer um novo calendário global cada vez que um novo lote chega. No entanto, a maioria das regras de sequenciamento comuns são míopes, ou seja, suas decisões de sequenciamento são baseadas em informações locais. Como resultado, seu desempenho, na maioria das situações, está longe de ser ideal (EL-BOURI, 2012).

As regras de sequenciamento não garantem a obtenção de soluções ótimas e sua disseminação é atribuída à sua simplicidade e eficiência, à luz da dificuldade computacional de problemas de sequenciamento. No entanto, é, muitas vezes, a causa do baixo desempenho no chão de fábrica em razão de sua natureza míope (NGUYEN et al., 2013; SUN; NOBLE, 1999). Outro aspecto que torna as regras de sequenciamento atraentes para pesquisadores e profissionais é que elas não possuem problemas de escala, que se caracterizam como um problema verificado em quase todos os métodos de otimização (NGUYEN et al., 2013).

As regras de sequenciamento mais comumente aplicadas, segundo Nguyen et al. (2013) e Su e Romanowski (2013), são:

- a) FIFO (*First in First out*) – A primeira tarefa que chegou à fila é a primeira a ser processada;
- b) SPT (*Shortest Processing Time*) – A tarefa selecionada é a que tiver o menor tempo de processamento entre as tarefas da fila;
- c) LPT (*Longest Processing Time*) – A tarefa selecionada é a que tiver o maior tempo de processamento entre as tarefas da fila;
- d) LSO (*Longest Subsequent Operation*) – A tarefa selecionada é a que pertence ao lote que tem a mais longa tarefa subsequente;
- e) LRM (*Longest Remaining Processing Time*) – A tarefa selecionada é a que pertence ao lote que tem o tempo restante de processamento mais longo;
- f) MWKR (*Most Work Remaining*) – Selecionar a tarefa que tem a maioria do trabalho restante;
- g) SWKR (*Smallest Work Remaining*) – Selecionar a tarefa que tem o menor trabalho restante;
- h) MOPR (*Largest Number of Operations Remaining*) – Selecionar a tarefa que tem maior número de trabalhos restantes;
- i) EDD (*Earliest Due Date*) – Selecionar a tarefa que tem menor data de entrega;
- j) MS (*Minimum Slack*) – Selecionar a operação que tem folga mínima;
- k) WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*) – A tarefa é selecionada a partir da ordem crescente ponderada da razão entre os tempos de processamento e a sua prioridade de atendimento;

Regras de sequenciamento mais elaboradas permitem a utilização de diferentes parâmetros, podendo formular funções com objetivos mais complexos e, como resultado, melhorar o desempenho prático da aplicação. Tais regras surgiram com a concatenação de regras elementares ponderadas por parâmetros de escalas, como as regras ATC (PINEDO, 2012).

2.3.1 Regra de Sequenciamento ATC

A heurística ATC (*Apparent Tardiness Cost*) é uma regra composta que se aplica a problemas com uma ou várias máquinas, que tem como objetivo minimizar o atraso ponderado. A ATC combina a regra ponderada WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*) – tempo de processamento mais curto e a regra MS (Minimum Slack) – regra de folga mínima, calculando um índice de prioridade para cada lote restante a cada vez que uma máquina se torna disponível. Com isso, o lote com a maior prioridade é selecionado para ser processado. O índice de prioridade I_j do lote j no tempo t é definido na Equação 4.

$$I_j = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_p}\right) \quad (4)$$

Onde w_j é o peso que define a priorização da tarefa j , p é o tempo de processamento, d é o prazo de execução e K_p é um parâmetro de escala determinado empiricamente. Se K é muito grande, a regra ATC se reduz à regra WSPT; se K é muito pequeno a regra ATC se reduz à regra MS (PINEDO, 2012).

Uma extensão da regra ATC para trabalhar com tempos de *setup* é denominada ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*), na qual foi incluído um segundo termo exponencial, que considera tempos de *setup* entre a tarefa concluída e a próxima tarefa a ser processada, conforme Equação 5.

$$I_j = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{jk}}{K_{2s}}\right) \quad (5)$$

Na Equação 5, δ_{jl} representa o tempo de *setup* causado pela transição da tarefa k para tarefa j . As variáveis K_1 e K_2 são os parâmetros de escala empíricos relacionados com o tempo de entrega e *setup*.

2.4 DISTRIBUIÇÃO EM *JOB SHOP* FLEXÍVEL

O problema definido na literatura como distribuição em *Job Shop* Flexível (DFJS), foi colocado por De Giovanni e Pezzella (2010), como um processo de três decisões de escalonamento: (i) Atribuição do lote à linha de produção; (ii) Sequenciamento dos lotes; (iii) Alocação das tarefas aos operadores.

Os autores (DE GIOVANNI; PEZZELLA, 2010) propõem um novo procedimento de otimização, combinando algoritmos genéticos e heurísticos de busca local para resolver problemas de programação distribuídos em ambientes de produção flexíveis. Um novo mecanismo de cruzamento foi introduzido por Chan, Chung e Chan (2005) para melhorar o desempenho da pesquisa genética em problemas com múltiplas fábricas e múltiplos produtos.

O trabalho de Chung et al. (2010) recomenda um algoritmo genético modificado e considera restrições de capacidade, precedência de operações, diferentes tempos de processamento, tempos de *setup* e transporte entre as fábricas. Já a pesquisa de Lu et al. (2015), sugere uma simplificação no cromossomo, com o objetivo de evitar indivíduos inválidos durante o processo de evolução da população. A proposta gera um cromossomo com uma dimensão que é decomposta utilizando três heurísticas que executam uma distribuição que tende a ser balanceada.

A proposta de Jia et al. (2007) é integrar o gráfico de Gantt com um algoritmo genético inovador, que aplica um operador de crossover uma vez e operador de mutação duas vezes, no intuito de melhorar simultaneamente as seleções de fábrica e a sequência dos lotes. O trabalho de Liu, Chen e Chou (2015) propõe um operador de codificação refinado que integra conceitos de probabilidade em um método de codificação de parâmetro real, para evitar geração de indivíduos inválidos.

A pesquisa de Naderi e Azab (2014) propôs dois modelos matemáticos em programação linear inteira mista, com variáveis a partir de sequência e posição para resolver pequenas instâncias do problema de forma exata. Já o trabalho de Sun, Chung e Chan (2015) estuda a relação entre a alocação de lotes, programação de produção, gerenciamento de armazenamento e determinação da política de transporte para expedição marítima.

Por fim, Ziaee (2013) desenvolveu um algoritmo heurístico rápido baseado em um procedimento construtivo que é capaz de obter um escalonamento de qualidade e com agilidade. O algoritmo é testado em casos de referência da literatura, a fim de avaliar o seu desempenho. Desse modo, resultados computacionais já evidenciam que, apesar de sua simplicidade, a heurística proposta é computacionalmente eficiente em problemas práticos.

2.5 BALANCEAMENTO DE LINHA DE MONTAGEM

O problema de balanceamento de linha de montagem (ALB) consiste em atribuir uma série de atividades em um conjunto de estações de trabalho de modo a otimizar uma medida de eficiência, respeitando as restrições de precedência (BECKER; SCHOLL, 2006). O principal objetivo do ALB é alocar as tarefas uniformemente sobre cada estação de trabalho, de forma que o tempo de ociosidade dos recursos seja minimizado (KUMAR; MAHTO, 2013). O processo de balanceamento de produção depende do correto entendimento de alguns conceitos que serão introduzidos no decorrer da próxima seção.

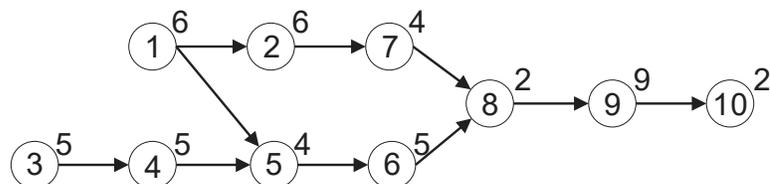
2.5.1 Linhas de Montagem

Uma linha de montagem pode ser definida como um conjunto de estações de trabalho compostas por um ou vários operadores, dispostas de forma sequencial e ligadas por intermédio de um sistema de transporte de material, no qual cada estação é responsável por um conjunto de tarefas predefinidas no processo de montagem dos produtos. As linhas de montagem foram desenvolvidas e aplicadas na produção em massa de produtos padronizados, explorando a especialização de trabalho e os efeitos da aprendizagem; atualmente, tal arranjo vem ganhando importância na produção em baixos volumes (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2006).

O processo de construção de um produto é dividido em operações elementares chamadas de tarefas, e o tempo de execução de uma tarefa i é dado pelo tempo p_i , em que cada tarefa necessita de um equipamento e capacitação do operador para ser executada. Em razão das condições tecnológicas e organizacionais, é necessário respeitar as restrições de precedência das tarefas que

podem ser representadas por meio de um grafo direcionado composto por nós numerados, os quais representam as tarefas, e por arcos que definem o tempo e relações de precedência entre as tarefas. As relações de precedência podem ser resumidas e apresentadas por um grafo direcionado, conforme a Figura 10, no qual $n = 10$ tarefas, todas com seus respectivos tempos e suas precedências. O grafo descreve que a tarefa 5 requer que as tarefas 1 e 4 (predecessores diretos) e a tarefa 3 (predecessor indireto) sejam completadas antes da sua execução (SCHOLL; BECKER, 2006).

Figura 10 – Grafo de precedência

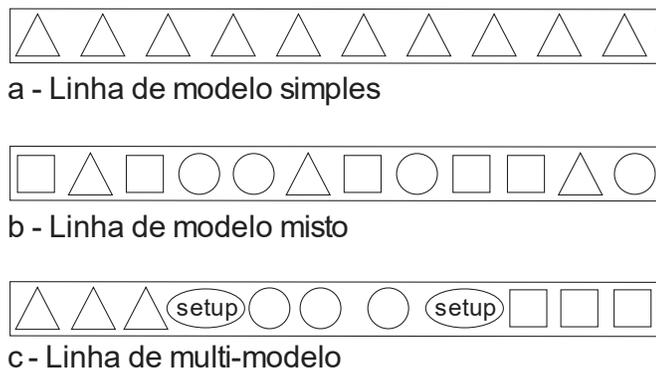


Fonte: adaptada de Scholl e Becker (2006).

As linhas de produção podem ser classificadas quanto ao número de produtos, conforme a Figura 11, onde cada figura geométrica representa um diferente modelo produtivo (BECKER; SCHOLL, 2006), no qual a linha de produção simples representa a produção em massa de um único produto e a linha de produção mista é utilizada na produção de vários modelos de um produto, geralmente, com tempo de *setup* insignificante. Já a linha multimodelo é utilizada quando existem diferenças significativas entre cada modelo de produto, em regra, usada em lotes.

Uma característica importante da linha de montagem diz respeito à variabilidade do tempo da tarefa. Tarefas com pouca variação de tempo em relação ao tempo estimado são comumente tarefas simples ou estações automatizadas, nas quais os tempos são considerados deterministas. Já tarefas com maior diferença em relação ao tempo estimado, que são consideradas, principalmente, em razão da instabilidade de trabalhos manuais relacionados à habilidade e motivação dos empregados, exigem que o tempo seja considerado estocástico (BECKER; SCHOLL, 2006).

Figura 11 – Linhas de montagem



Fonte: adaptada de Becker e Scholl (2006).

Ao projetar uma linha de montagem, algumas restrições devem ser impostas ao agrupamento de elementos de trabalho, como Ponnambalam, Aravindan e Naidu (2000) observam:

- Gráfico de precedência das tarefas;
- O número de estações de trabalho necessárias deve ser menor que o número de estações de trabalho disponíveis;
- O tempo de ciclo deve ser maior ou igual ao máximo tempo de qualquer estação de trabalho.

Segundo Boysen, Fliedner e Scholl (2006), as linhas de montagem podem ser classificadas com base em três elementos representados pela notação $[\alpha | \beta | \gamma]$, em que α representa as características do grafo de precedência, β representa as características da estação e da linha de produção e γ representa os objetivos. Para cada um dos elementos descreve-se uma série de possibilidades e restrições que são encontrados em problemas reais e retratados pela literatura.

2.5.2 Balanceamento da Linha de Montagem

O problema de balanceamento da linha surge quando se decide distribuir as tarefas entre as estações de forma que cada estação fique com uma mesma carga produtiva (BECKER; SCHOLL, 2006). O balanceamento de uma linha de montagem é o processo de alocar de forma equilibrada as tarefas de um lote entre as estações,

guiado por um objetivo conhecido por *Assembly Line Balancing Problem* (ALBP). Qualquer ALBP visa encontrar uma alternativa viável e equilibrada para a linha de produção, na qual cada tarefa esteja relacionada a uma estação de trabalho e as restrições de precedência sejam respeitadas.

Os problemas de balanceamento podem ser classificados em três tipos diferentes (TASAN; TUNALI, 2008): ALBP-I – o objetivo é minimizar o número de estações de trabalho, para determinado tempo de ciclo; ALBP-II – o objetivo é minimizar o tempo de ciclo, para determinado número de estações de trabalho; ALBP-III – o objetivo é balancear a carga de trabalho para determinado número de estações de trabalho.

As linhas de produção também podem ser classificadas, como linha de modelo único, modelo misto e multimodelo, conforme os produtos que a linha de produção está apta a produzir. O modelo único produz apenas um produto, o modelo misto produz múltiplos produtos, enquanto um modelo múltiplo produz uma sequência de lotes (BECKER; SCHOLL, 2006).

A classificação do ALBP, proposta por Baybars (1986), divide os problemas em duas classes:

- a) Problema de Balanceamento da Linha de Montagem Simples (SALBP, em inglês *Simply Assembly Line Balancing Problem*);
- b) Problema de Balanceamento da Linha de Montagem Geral (GALBP, em inglês *General Assembly Line Balancing Problem*).

A SALBP é o problema mais estudado no campo de balanceamento de linha de montagem e, segundo Scholl e Becker (2006), possui as seguintes propriedades: (i) produção em massa de um produto homogêneo; (ii) todas as tarefas são processadas de um modo predeterminado; (iii) linha compassada com tempo de ciclo c fixo de acordo com uma desejada quantidade de resultado; (iv) tempos de tarefas determinísticos e inteiros; (v) nenhuma restrição de atribuição além das restrições de precedência; (vi) *layout* da linha em série com m estações somente de um lado e sem linha de alimentação; (vii) a sequência do processamento das tarefas está sujeita a restrições de precedência; (viii) uma tarefa não pode ser dividida entre duas ou mais estações; (ix) todas as estações são igualmente equipadas com respeito a máquinas e trabalhadores; (x) maximização da eficiência da linha:

$Eff = \frac{p_{sum}}{m \times TC}$, na qual m é o número de estações de trabalho, TC é o tempo de ciclo e

$p_{sum} = \sum_{i=1}^n TC_i$ é a soma dos tempos de todas as tarefas i .

Os SALBP foram classificados em quatro tipos diferentes em relação à função objetivo, conforme pode ser visualizado a seguir (SCHOLL, 1999):

- a) SALBP-1: Dado um tempo de ciclo c , minimizar o tempo ocioso das estações;
- b) SALBP-2: Dado o número de estações, minimizar o tempo de ciclo;
- c) SALBP-E: Se nem o tempo de ciclo, nem o número de estações é informado, o objetivo é encontrar qual a melhor configuração da linha para alcançar melhor eficiência;
- d) SALBP-F: Se o tempo de ciclo e o número de estações são informados, o objetivo passa a ser encontrar uma configuração equilibrada e viável para a linha.

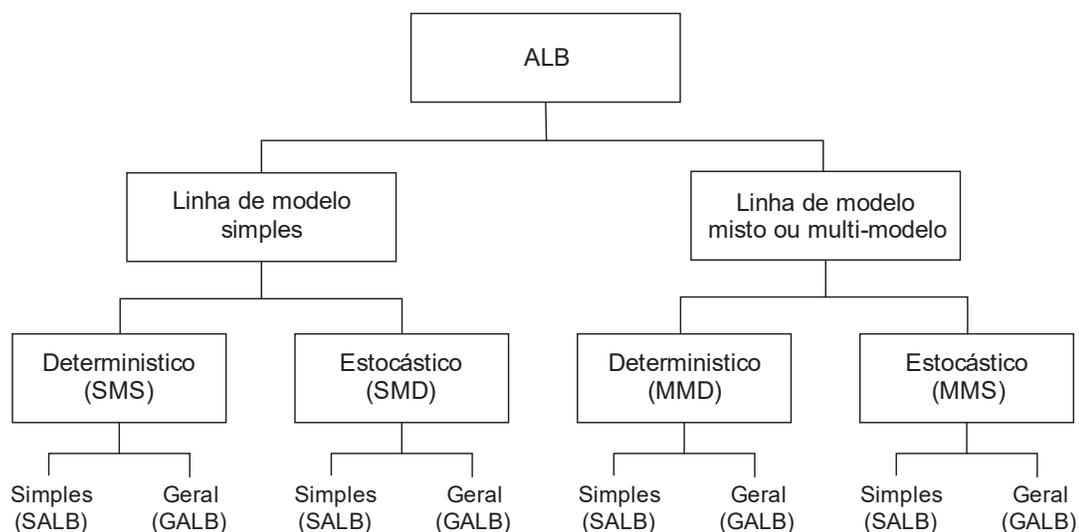
É possível perceber que as características do SALBP são restritas, o que dificulta representar adequadamente problemas complexos do mundo real. Para problemas com um número maior de considerações, são utilizados os chamados problemas de balanceamento de linhas de montagem gerais (GALBP), que, atualmente, vêm ganhando mais interesse por parte dos pesquisadores (MARTINO; PASTOR, 2010).

Mesmo com várias descrições do ALBP na literatura, há cinco características presentes em qualquer tipo de ALBP (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2006). São elas: (i) os produtos são conhecidos; (ii) um conjunto de processamentos alternativos é dado; (iii) a linha deve ser configurada de modo que as quantidades alvo de produção sejam satisfeitas, considerando certo horizonte de planejamento; (iv) o fluxo da linha é unidirecional; (v) a sequência de processamento das tarefas está sujeita a restrições de precedência.

É possível visualizar a classificação dos ALB na Figura 12, na qual os problemas são subdivididos em linha de modelo simples ou multimodelo/misto e em relação à variabilidade dos tempos determinístico ou estocástico e no último nível em problemas de SALBP e GALBP (GHOSH, 1989; KUMAR; MAHTO, 2013). As linhas multimodelos são utilizadas para montagem de dois ou mais modelos de um mesmo produto simultaneamente. A quantidade de cada modelo produzido pela

linha é normalmente baixa, em virtude da necessidade do cliente por modelos exclusivos. Essas características podem ser encontradas em diversas áreas da indústria, como exemplos: indústrias de vestuário, automobilística e aparelhos eletrônicos (SARKER; PAN, 1998).

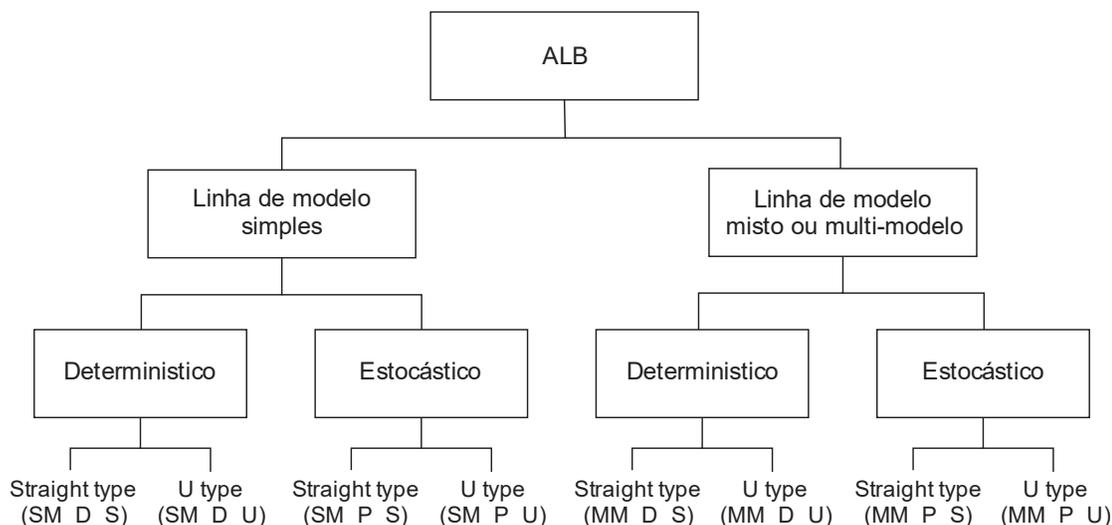
Figura 12 – Classificação ALBP



Fonte: adaptada de Ghosh (1989).

Uma classificação similar pode ser analisada na Figura 13, na qual Sivasankaran e Shahabudeen (2014) substituíram o último nível pelas características da linha de montagem.

Figura 13 – Classificação ALBP



Fonte: adaptada de Sivasankaran e Shahabudeen (2014).

Os problemas de balanceamento também podem ser classificados conforme seus objetivos (PONNAMBALAM; ARAVINDAN; NAIDU, 2000):

- a) Tipo 1: Determinados o tempo de ciclo e a precedência, o objetivo é minimizar o número de estações de trabalho. Esse modelo surge quando há a concepção de novas linhas de montagem;
- b) Tipo 2: Determinadas as estações de trabalho, o objetivo é minimizar o tempo de ciclo. Nesse modelo é necessário tratar a precedência das tarefas e o posicionamento dos postos de trabalho.

Algumas definições dadas por Kumar e Mahto (2013) são necessárias para melhor compreensão dos cálculos de balanceamento de uma linha de montagem. Tais definições são descritas na sequência.

O tempo total (TT) necessário para a produção de um produto é igual ao somatório dos tempos de todas as tarefas, conforme Equação 6, na qual p_j é o tempo necessário para completar a tarefa j e n é o número de tarefas a serem executadas.

$$TT = \sum_{j=1}^n p_j \quad (6)$$

Tempo de ciclo, apresentado na Equação 7, é o tempo entre as saídas consecutivas de um produto de uma linha de montagem, ou seja, corresponde ao maior tempo gasto em uma estação de trabalho na linha de montagem e.

$$TC = \frac{\textit{Tempo disponível}}{\textit{numero de peças pretendidas}} \quad (7)$$

O cálculo do número mínimo de estações necessárias está descrito na Equação 8; nessa equação, valores decimais devem ser arredondados para cima.

$$NE = \frac{TT}{TC} \quad (8)$$

A eficiência (*Eff*) está definida na Equação 9, na qual NE representa o número de estações. Já a folga (FG) na linha de montagem está definida na Equação 10.

$$Eff = \frac{TT}{TC} - (NE) \times (TC) \quad (9)$$

$$FG = (NE \times TC) - TT \quad (30)$$

2.5.3 Técnicas de Solução ALBP

A literatura inclui um grande número de procedimentos para solução dos ALBP, como pode ser analisado na pesquisa de Boysen, Fliedner e Scholl (2006). As diversas técnicas de solução podem ser classificadas como (BAUTISTA; PEREIRA, 2009):

- a) Modelos Heurísticos: utilizam regra de prioridade para atribuir tarefas a diferentes estações de trabalho, produzindo boas soluções em um tempo computacional reduzido. Dentre os procedimentos é possível destacar: Método dos pesos posicionais (RPW – *Rank Positional Weight*); Método de

Kilbridge e Wester (KWM); esta regra do maior candidato (LCR – *Largest Candidate Rule*);

- b) Modelos Matemáticos: normalmente baseados em árvores de busca, programação dinâmica ou algoritmo de *Branch and Bound*;
- c) Modelos meta-heurísticos: não produzem resultados tão bons como procedimentos de enumeração, porém possuem maior aplicabilidade em relação aos procedimentos para os problemas gerais. Dentre os principais, é possível destacar: busca local; colônia de formigas; *Simulated annealing* e Algoritmos genéticos.

Não há um modelo desenvolvido versátil o suficiente para atender juntamente todas as condições especiais que envolvem os ALBP (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2008). Uma união de todos os aspectos relacionados ao processo de balanceamento em um único modelo é uma ambição distante, por esse motivo, diversos modelos são pesquisados e propostos para resolver problemas específicos.

Ponnambalam, Aravindan e Naidu (1999) comparam o desempenho de seis heurísticas para o balanceamento de linhas de produção. Para eles, o método de Hoffmann foi considerado o melhor, porém o tempo de execução é maior, uma vez que tal método enumera todos os conjuntos de tarefas alternativas possíveis nas estações. Os mesmos autores obtiveram bons resultados com o método de pesos posicionais (RPW- *Ranked Positional Weight*), com menor tempo de execução. Outros autores (CHAVARE; MULLA, 2015; MOHAN; GANESAN; SURESH, 2013; FAZLOLLAHTABAR; HAJMOHAMMADI; ESHAGHZADEH, 2011) obtiveram bons resultados na aplicação do método RPW.

Segundo Brahim et al. (2002), o método RPW soma o tempo da tarefa e os tempos das tarefas antecessoras, definindo o peso posicional da tarefa. Desse modo, as tarefas são classificadas em ordem decrescente de peso posicional e, então, escolhidas na ordem e atribuídas às estações de trabalho. Se todos os antecessores da tarefa já foram atribuídos e a tarefa se encaixa no tempo restante na estação, a tarefa é atribuída, do contrário a tarefa é ignorada e a próxima tarefa da lista é selecionada. Se nenhuma tarefa entrar na estação, a estação é fechada e uma nova estação é aberta. As tarefas são então reinicializadas e uma tentativa é feita para atribuir tarefas não atribuídas a uma nova estação. O processo é repetido até que todas as tarefas sejam atribuídas.

3 MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo sugere uma solução para o problema de alocação em um ambiente DJSF, o qual é caracterizado por linhas de produção multimodelo, com operadores polivalentes e terceirização parcial da produção. Nesse contexto, um conjunto de lotes é submetido à produção em um horizonte de planejamento e a sistemática deve distribuir os lotes entre as linhas de produção de forma que as linhas internas fiquem completamente ocupadas no período e o excedente da produção seja encaminhado a linhas de produção terceirizadas, visando a atender indicadores de qualidade de entrega.

No desenvolvimento da sistemática proposta as seguintes premissas e definições são consideradas:

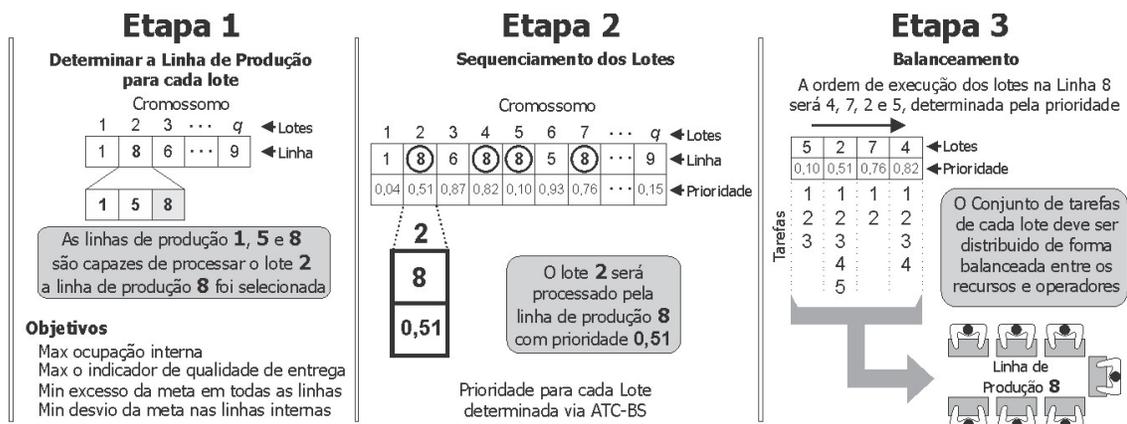
- a) Um produto é um objeto colocado à venda que sofre um processo de produção;
- b) O processo de produção de um produto passa por diversas fases e cada fase demanda a execução de um conjunto de tarefas;
- c) Cada fase de produção pode ser executada internamente ou terceirizada;
- d) Pressupõe-se que os recursos e operadores necessários para execução de cada fase estejam agrupados em linhas de produção, capacitados a produzir qualquer produto, desde que possuam todos os recursos necessários;
- e) Vários clientes podem comprar o mesmo modelo de um produto. As vendas de clientes que compraram um modelo são agrupadas e produzidas em um lote de produção;
- f) Um lote pode ser criado com a finalidade de atender às vendas ou produzir para estoque (ou ambas as finalidades) em um único lote;
- g) Uma tarefa é uma atividade executada com o intuito de produzir um produto. Para executar uma tarefa são necessários um operador e um recurso disponíveis durante um intervalo de tempo;
- h) Um recurso é um equipamento, máquina ou ferramenta que pertence a uma linha de produção. Cada recurso pode processar somente uma tarefa por vez, e necessita, durante o processamento, um operador disponível;
- i) Cada linha de produção possui um conjunto de operadores e recursos predefinidos e fixos. Em alguns casos, o número de recursos excede o de

- operadores e é permitido que um operador manipule mais de um recurso, desde que não seja simultaneamente;
- j) Uma linha de produção externa (terceirizada) pertence à outra empresa e pode ser contratada para processar determinados lotes de produção;
 - k) Um operador é um funcionário alocado a uma linha de produção e que está capacitado a operar qualquer recurso presente na linha;
 - l) O tempo de processamento será igual para recursos idênticos, mesmo que estejam em linhas de produção diferentes;
 - m) Os lotes são independentes, ou seja, a produção de um lote não depende da produção dos demais;
 - n) A produção de um lote não pode ser interrompida;
 - o) O tempo de processamento de cada tarefa foi obtido considerando o ritmo do operador e a tolerância (incremento de 15% que corresponde à fadiga, necessidades pessoais, *setup* e movimentação dos materiais. Segundo Graeml e Peinado (2007), as empresas brasileiras têm utilizado uma tolerância entre 15% a 20% do tempo trabalhado);
 - p) O tempo de transporte foi desconsiderado; e
 - q) Todas as linhas de produção, lotes, recursos e materiais estão disponíveis no início e durante todo o período da programação.

A sistemática proposta apoia-se em 3 etapas operacionais, apresentadas na Figura 14. Definido o conjunto de lotes a ser fabricado, a primeira etapa da sistemática é responsável por determinar a linha de produção em que cada lote será processado, de maneira a endereçar os seguintes objetivos: (i) maximizar a ocupação interna dos operadores; (ii) melhorar os indicadores relacionados ao despacho, tais como, número de clientes atendidos, número de sobras no estoque, quantidade de produtos entregue e quantidade de produtos entregue em atraso; (iii) minimizar a soma do valor absoluto da diferença entre o *makespan* das linhas de produção internas e o fim do horizonte de planejamento; e (iv) reduzir a diferença entre o *makespan* e o término do horizonte de planejamento. Para tanto, utiliza um algoritmo genético multiobjetivo que retorna um conjunto de soluções com menor grau de dominância. A sistemática proposta prioriza a solução que obteve a melhor ocupação dos operadores internos, com menor diferença entre o término das linhas de produção internas e o horizonte de programação, que tenham a menor diferença

entre o *makespan* e o fim do horizonte de programação e com melhor resultado para os indicadores de despacho.

Figura 14 – Etapas do método proposto



A segunda etapa da sistemática proposta determina a prioridade de cada lote que define a sequência de processamento dos lotes em cada linha de produção. Já a terceira etapa destina-se a definir os recursos para cada operador da linha de produção e distribuir as tarefas de cada lote dentro das linhas de produção de forma balanceada.

Para comparar o planejamento atual com o planejamento elaborado pelas três etapas da sistemática foi necessário desenvolver um modelo de simulação no software Promodel, a fim de representar o ambiente de produção. Esse modelo é necessário em virtude da dificuldade de comparar os planejamentos no ambiente real, que é marcado pela produção de lotes que não se repetem e por tarefas manuais que resultam em desvios no tempo previsto, mesmo para execução de tarefas idênticas. Nesse contexto, entende-se que o modelo permite simular a produção dos mesmos lotes nas mesmas condições, sem sofrer as distorções causadas pelo ambiente.

Esse modelo recebe como entrada um arquivo cujo formato está definido no Apêndice B, que descreve os dados a serem otimizados pela sistemática ou no formato do Apêndice C, que demonstra o resultado da otimização realizada, uma descrição detalhada da relação entre os dados de entrada; o *framework* e o algoritmo da sistemática encontram-se no Apêndice D. O Apêndice E exibe os dados

extraídos da execução do modelo de simulação e são necessários para comparar as metodologias.

As três etapas propostas estão correlacionadas na medida que o desempenho do sequenciamento e do balanceamento dependem das características dos lotes e dos atributos das linhas de produção em que são processados. Os próximos subcapítulos detalham as três etapas propostas e como elas se relacionam.

3.1 ETAPA 1 – OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE LOTES ÀS LINHAS DE PRODUÇÃO

A estratégia de otimização implementada nesta etapa está fundamentada no algoritmo multiobjetivo NSGAI, cuja função é explorar o conjunto solução, promovendo alterações nas linhas de produção em que os lotes serão processados em busca de uma combinação que reduza a soma do valor absoluto da diferença entre o *makespan* de cada linha de produção interna e o fim do horizonte de planejamento, que melhore a ocupação interna dos operadores, diminua a diferença entre o *makespan* e o término do horizonte de planejamento e, ao mesmo tempo, melhore os indicadores de despacho, tais como, número de clientes atendidos, número de sobras no estoque, quantidade de produtos entregue e quantidade de produtos entregue em atraso.

A formulação matemática que descreve a alocação, sequenciamento e balanceamento das tarefas dos lotes em linhas produção com operadores polivalentes e terceirização parcial da produção se apoia nos seguintes índices e variáveis:

Índices

g – Índice dos lotes de produção;

h – Índice dos produtos;

i – Índice dos recursos;

j – Índice das tarefas;

l – Índice das linhas de produção;

o – índice dos operadores;

Variáveis de entrada

- A_g – Informa o índice do produto h relacionado ao lote g ;
- E_l – Define se a linha de produção l é interna (1) ou se é terceirizada (0);
- H_h – Retorna o número de clientes que compraram o produto h ;
- I_g – Informa a prioridade de processamento do lote g , a partir da alteração proposta na regra de sequenciamento ATC;
- J_g – Indica o número de tarefas do lote g ;
- $P_{j,k}$ – Retorna 1 se a tarefa j precede a tarefa k , 0 caso contrário;
- Q_h – Informa a quantidade de vendas do produto h ;
- V_g – Indica a quantidade de produtos em produção no lote g ;
- W_l – Informa a quantidade de operadores que a linha de produção l possui.
- d_o – Indica a quantidade de dias para a entrega do pedido o ;
- $m_{i,l}$ – Informa a quantidade de recursos do tipo i a linha de produção l possui;
- $p_{j,h,i}$ – Retorna o tempo de processamento da tarefa j do produto h no recurso i ;
- z – Informa a quantidade de tipos de recursos;
- O – Informa o número total de clientes;
- q – Informa o número total de lotes;
- v – Informa o número total de linhas de produção;
- TL – Retorna o tempo em minutos do horizonte de planejamento;

Variáveis de decisão

- $B_{j,g,i,l,o}$ – Informa o momento de início da tarefa j pertencente ao lote g processada no recurso i da linha de produção l e executada pelo operador o ;
- $C_{j,g,i,l,o}$ – Informa o momento de conclusão da tarefa j pertencente ao lote g processada no recurso i da linha de produção l e executada pelo operador o ;
- $G_{g,l}$ – Retorna 1 se o lote g for processado pela linha de produção l , e 0 caso contrário;
- $R_{i,l,o}$ – Retorna 1 se o recurso i da linha de produção l está alocado para o operador o , e 0 caso contrário.

As funções objetivo a serem otimizadas são apresentadas nas equações 11 a 14:

$$Min OC = \sum_{l=1}^v \sum_{g=1}^q \sum_{o=1}^{W_l} \sum_{i=1}^z \sum_{j=1}^{J_g} \left((B_{j+1,g,i,l,o} - C_{j,g,i,l,o}) \times E_l \right) \quad (11)$$

$$Max e = \sum_{g=1}^q \left(\frac{I_g}{Max(C_{j,g,i,l,o})} \right) \quad \forall (j, i, l, o) \quad (12)$$

$$Min DE = \sum_{l=1}^v (|Max(C_{j,g,i,l,o}) - TL| \times E_l) \quad \forall (j, g, i, o) \quad (13)$$

$$Min EH = \begin{cases} Max(C_{j,g,i,l,o}) - TL, & se Max(C_{j,g,i,l,o}) > TL \\ 0, & se Max(C_{j,g,i,l,o}) \leq TL \end{cases} \quad \forall (j, g, i, l, o) \quad (14)$$

Onde:

- A Equação 11 tem o propósito de reduzir o tempo entre as tarefas, que reduz o tempo ocioso dos operadores, melhorando a porcentagem de ocupação dos operadores internos ($E_l = 1$);
- A Equação 12 tem a finalidade de manter a ordem de fabricação dos lotes durante o processo de otimização, pois a distribuição dos lotes em linhas de produção com capacidade diferente produz alterações na ordem original estabelecida. Assim, a equação é definida a partir do somatório da divisão do índice de priorização I_g pelo momento de fim da última tarefa do lote ($Max(C_{j,g,i,l,o})$), onde I_g é definido na Equação 22 da etapa de sequenciamento;
- A Equação 13 tem a finalidade de igualar o término das linhas de produção internas ($E_l = 1$), com o término do horizonte de planejamento TL . DE é calculado por intermédio da somatória do valor absoluto da subtração do

momento término da última tarefa de cada linha de produção interna pelo momento de fim do horizonte de planeamento;

- A Equação 14 minimiza a diferença entre o *makespan* e o término do horizonte de planeamento. A equação retorna a diferença entre o momento de término e o horizonte de planeamento, se o momento de término for maior que o horizonte de planeamento e retorna 0, caso contrário.

A otimização dos objetivos deve respeitar as restrições representadas nas equações 15 a 20.

$$\sum_{l=1}^v \sum_{g=1}^q (G_{g,l}) = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^v \sum_{i=1}^z \sum_{o=1}^{W_l} (R_{i,l,o}) \leq m_{i,l} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^z (R_{i,l,o}) > 0 \quad \forall (l, o) \quad (17)$$

$$C_{j,g,i,l,o} = B_{j,g,i,l,o} + (p_{j,A_g,i} \times V_g) \quad \forall (j, g, i, l, o) \quad (18)$$

$$B_{j,g,i,l,o} \geq C_{j',g',i',l,o'} \quad \forall (j, g, i, l, o, j', i', o') \mid (j' \in \{1 \dots J_g\}), \\ (i' \in \{1 \dots z\}), (j \neq j'), (o' \in \{1 \dots W_l\}), (P_{j,j'} = 1) \quad (19)$$

$$\sim \left(\left((B_{j,g,i,l,o} \geq B_{j',g',i',l,o}) \wedge (B_{j,g,i,l,o} \leq C_{j',g',i',l,o}) \right) \vee \right. \\ \left. \left((C_{j,g,i,l,o} > B_{j',g',i',l,o}) \wedge (C_{j,g,i,l,o} \leq C_{j',g',i',l,o}) \right) \vee \right. \\ \left. \left((B_{j,g,i,l,o} \leq B_{j',g',i',l,o}) \wedge (C_{j,g,i,l,o} \geq C_{j',g',i',l,o}) \right) \right) \quad \forall (j, j', g, g', i, i', l, o) \mid (j' \in \\ \{1 \dots J_g\}), (g' \in \{1 \dots q\}), (i' \in \{1 \dots z\}), (j \neq j') \quad (20)$$

Onde:

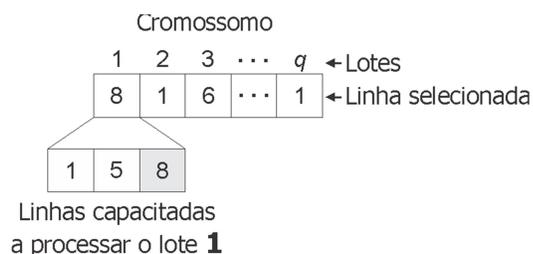
- A Equação 15 faz com que cada lote l seja direcionado a exatamente uma linha de produção l ;
- A Equação 16 não permite que seja alocado, entre os operadores o , uma quantidade de recursos i maior que a quantidade pertencente à linha de produção l ;
- A Equação 17 obriga que cada operador o esteja alocado a pelo menos um recurso i na linha de produção l ;
- A Equação 18 determina que o momento de fim da tarefa deva ser igual ao início (B) somado à quantidade de peças no lote (V_g) multiplicado pelo tempo da tarefa ($p_{j,A_g,i}$);
- A Equação 19 cuida para que as restrições de precedência sejam respeitadas, impondo que o momento de início $B_{j,g,i,l,o}$ da tarefa j do lote g , seja maior ou igual ao momento de fim $C_{j',g',i',l,o'}$ de qualquer tarefa pertencente ao mesmo lote g , desde que $P_{j,j'} = 1$;
- A Equação 20 impede que uma tarefa seja alocada em conflito de tempo a um operador o de uma linha de produção l . A equação nega as afirmações de possíveis conflitos entre as tarefas, onde $\left((B_{j,g,i,l,o} \geq B_{j',g',i',l,o'}) \wedge (B_{j,g,i,l,o} \leq C_{j',g',i',l,o'}) \right)$ afirma que a tarefa j teve o momento de início $B_{j,g,i,l,o}$, dentro do tempo de processamento da tarefa j' , e $\left((C_{j,g,i,l,o} > B_{j',g',i',l,o'}) \wedge (C_{j,g,i,l,o} \leq C_{j',g',i',l,o'}) \right)$ declara que a tarefa j teve o momento de fim $C_{j,g,i,l,o}$, finalizado durante o processamento da tarefa j' , e que $\left((B_{j,g,i,l,o} \leq B_{j',g',i',l,o'}) \wedge (C_{j,g,i,l,o} \geq C_{j',g',i',l,o'}) \right)$ alega que a tarefa j' está alocada dentro do intervalo de processamento da tarefa j .

Para facilitar o processo de evolução e permitir que o algoritmo efetue as modificações genéticas sem que indivíduos inválidos sejam criados, a estrutura do cromossomo foi inspirada na simplificação proposta por Lu et al. (2015), na qual cada lote corresponde a uma posição do gene no cromossomo do algoritmo genético e seu conteúdo determina qual a linha de produção em que o lote será

processado. A simplificação permite criar uma lista para cada lote de produção contendo as linhas de produção que possuem todos os recursos necessários para a execução do lote, ou seja, que estão habilitadas a processá-lo. Essa lista é utilizada para efetuar as modificações genéticas promovidas pelo algoritmo e impede a criação de soluções inviáveis.

Essa representação melhora o desempenho do algoritmo genético, reduzindo o tempo necessário para a convergência da solução, pois o algoritmo não perde tempo analisando soluções que não poderão ser aplicadas. A Figura 15 ilustra a representação do cromossomo proposto, no qual o lote 1 pode ser processado nas linhas de produção 1, 5 ou 8, e a linha de produção selecionada foi a linha de produção 8. Nessa representação, o tamanho do cromossomo é definido a partir do número de lotes a serem processados, já o tamanho da população (100) e o número de gerações (500) foram determinados de forma empírica.

Figura 15 – Cromossomo



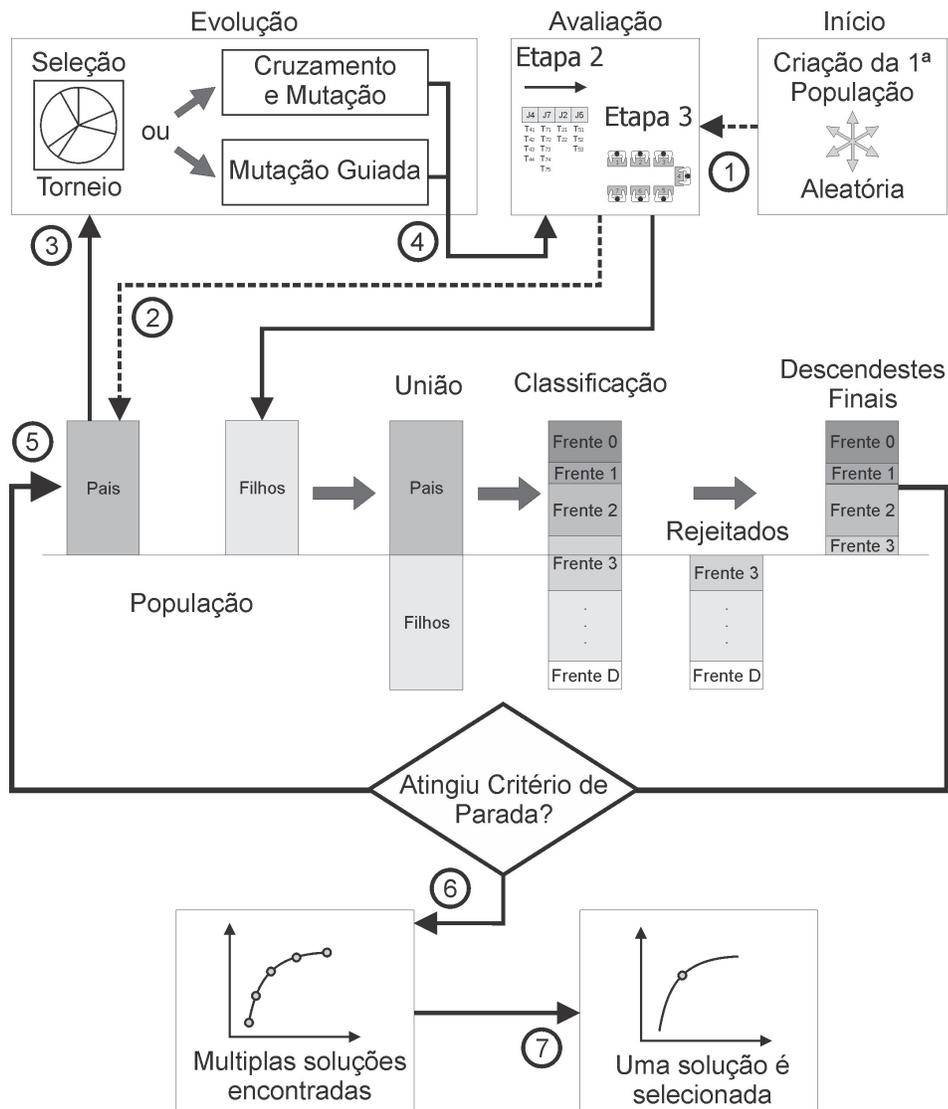
Como a sistemática favorece a ocupação das linhas de produção internas, para criar a primeira população foi implementado um procedimento que injeta indivíduos com características que favorecem a evolução (ou seja, indivíduos em que todos os lotes são alocados em linhas de produção internas). Esse procedimento cria 10% da primeira população selecionando, aleatoriamente para cada gene (lote) do cromossomo, uma dentre as linhas de produção internas habilitadas. O restante da população é criado aleatoriamente, de maneira que, para cada gene, uma linha de produção é selecionada de forma aleatória entre as linhas de produção capacitadas. O posicionamento desse procedimento dentro da sistemática está representado no movimento 1 da Figura 16.

Após criar a primeira população, os indivíduos (soluções) são avaliados com base na distribuição entre as linhas de produção indicada em cada indivíduo. A avaliação é executada distribuindo os lotes para as linhas de produção e, em cada

linha de produção, os lotes são ordenados e as tarefas dos lotes são distribuídas entre os operadores e recursos de forma balanceada. Por fim, os indicadores de desempenho são calculados nas equações 12, 13, 14 e 15 e armazenados em cada indivíduo, constituindo a primeira população de pais do algoritmo, conforme ilustrado no movimento 2 da Figura 16.

A população de pais é submetida ao processo de seleção intitulado “Torneio”, em que dois indivíduos são selecionados aleatoriamente na população de pais e comparados em relação à dominância e distância de aglomeração. O melhor indivíduo é escolhido para participar do processo de evolução, conforme indicado no movimento 3 da Figura 16.

Figura 16 – Processo de otimização



Após selecionar os pais, a sistemática propõe dois procedimentos evolutivos, cada um deles responsável pela criação de metade dos filhos da nova população. No primeiro procedimento evolutivo, os dois pais são submetidos ao operador genético de cruzamento uniforme, no qual um vetor de combinação determina o pai do qual cada gene será herdado. Esse vetor de combinação é recriado a cada cruzamento de forma aleatória, com a mesma probabilidade para cada gene (50%); com base nesse vetor e nos dois pais selecionados é possível elaborar dois filhos em um só cruzamento, conforme retratado na Figura 17.

Figura 17 – Cruzamento uniforme



Os dois filhos gerados no cruzamento são submetidos ao operador de mutação determinístico com taxa de variação linear. A taxa de mutação (TM) é obtida a partir da Equação 21, na qual o número de gerações (NG) e a geração atual (GA) são utilizados como parâmetros para o cálculo da taxa de mutação. O operador é aplicado para cada gene do cromossomo, onde um valor entre 0 e 1 é sorteado; se o valor for menor ou igual a TM , o gene é então alterado, selecionando, aleatoriamente, uma entre as linhas de produção capacitadas.

$$TM = \frac{0,1 \times (NG - GA)}{NG} \quad (21)$$

A importância da variação de TM aparece no início da otimização. Um maior valor de TM permite explorar uma grande região do conjunto solução (pois quanto maior TM , mais genes serão alterados). À medida que o algoritmo evolui, o valor de TM diminui, reduzindo o número de mutações e refinando o resultado final.

Esse procedimento evolutivo serve para explorar o conjunto de solução e a função do operador de cruzamento é preservar as características genéticas da população durante a evolução, investigando regiões dentro da região já explorada do conjunto solução. O operador de mutação, por sua vez, adiciona características

exploratórias, fazendo com que o algoritmo explore novas regiões, escapando dos ótimos locais.

No segundo procedimento evolutivo, cada pai selecionado é submetido a um operador de mutação guiada que, no primeiro passo, sorteia uma linha de produção capacitada para os lotes em que o momento de término ultrapassar o fim do horizonte de programação. Já no segundo passo adiciona ou retira lotes para as linhas de produção internas, de modo que o tempo de ocupação da linha de produção se aproxime do horizonte de programação. Esse procedimento de mutação guiada tem a finalidade de somente efetuar modificações no cromossomo que favoreçam os objetivos definidos nas Equações 12, 14 e 15.

O processo de evolução se repete até que uma nova população de filhos, com o mesmo tamanho N da população de pais, seja obtida. Essa nova população é submetida ao processo de avaliação que engloba as etapas 2 e 3 da sistemática e está representada no movimento 4 da Figura 16. Todos os novos indivíduos da população elaborada na etapa 1 são submetidos às etapas 2 e 3 da sistemática, que efetua o sequenciamento o balanceamento sobre a distribuição e fornece os dados necessários para a avaliação de cada indivíduo.

A população de filhos é então somada à população de pais, resultando em uma única população que é então ordenada segundo o grau de dominância e distância de aglomeração. A partir dessa nova população, os N melhores indivíduos são selecionados para evolução, enquanto os demais são descartados. Os sobreviventes formam a nova geração de pais e um novo processo de evolução é iniciado, conforme indicado no movimento 5 da Figura 16.

Além dos operadores genéticos de seleção, mutação e cruzamento, um mecanismo que permite à otimização sair de ótimos locais foi implementado. Se não houver modificação no melhor indivíduo da população por 20 gerações, esse recurso identifica que a otimização pode estar presa em um ótimo local e recria 90% da população de forma aleatória, mantendo 10% dos melhores indivíduos da população. A população é recriada com a intenção de explorar novas regiões do conjunto solução e sair de um ótimo local que o algoritmo pode ter encontrado durante a evolução, mantendo os melhores resultados alcançados até o momento.

O processo de evolução se repete por 500 gerações, quando um conjunto de soluções (indivíduos) com menor grau de dominância é retornado pelo algoritmo, como demonstrado no movimento 6 da Figura 16. A partir desse conjunto de

soluções é necessário decidir, dentre os indivíduos com menor grau de dominância, aquele que será retornado como resposta pela sistemática. O resultado final é selecionado de acordo com a preferência dos objetivos estabelecida pelo especialista na seguinte ordem:

- 1) Maior média de ocupação dos operadores internos;
- 2) Menor desvio de término das linhas de produção internas em relação ao horizonte de programação;
- 3) Menor diferença entre o makespan e o término do horizonte de programação;
- 4) Melhor desempenho nos indicadores de despacho (número de clientes atendidos, número de sobras no estoque, quantidade de produtos entregue e quantidade de produtos entregue em atraso).

O processo de seleção, retratado no movimento 7 da Figura 16, escolhe o indivíduo com maior média de ocupação e, caso ocorra empate, o segundo objetivo preferido é utilizado para desempate e, assim por diante, até que um indivíduo seja selecionado e retornado como solução proposta pela sistemática.

Finalizada a alocação dos lotes às linhas de produção, é necessário definir a sequência em que os lotes serão processados dentro de cada linha de produção. O próximo subcapítulo descreve como foi determinada a sequência de execução dos lotes na Etapa 2 do método.

3.2 ETAPA 2 – SEQUENCIAMENTO DOS LOTES EM CADA LINHA DE PRODUÇÃO

O sequenciamento dos lotes alocados a cada linha de produção na etapa anterior está apoiado em uma nova regra de priorização baseada na regra ATC. Tal regra privilegia as atividades com menor tempo de processamento (WSPT), bem como as atividades com menor folga (MS). A proposta, intitulada *Apparent Tardiness Cost with Better Shipment* (ATC-BS), modifica a regra original, com a intenção de priorizar atividades que atendam ao maior número de clientes com o maior número e itens.

A proposição tem como foco um ambiente de produção em lotes, no qual a quantidade em produção é estabelecida para atender a pedidos (*make-to-order*) e

estoque (*make-to-stock*) ao mesmo tempo. Nesse ambiente, os lotes que atendem ao estoque são projetados para completar a ocupação interna em períodos de baixas nas vendas com base em uma previsão de demanda.

Alinhado às proposições deste estudo, entende-se como importante priorizar lotes que (i) atendam ao maior número de clientes, e (ii) que a quantidade em produção seja equivalente à quantidade vendida, evitando o desperdício de tempo em lotes que tenham como destino o estoque. Tais condições não são contempladas pela regra ATC original, constituindo-se em contribuição original desta tese. As equações (23) a (25) descrevem a modificação proposta. Enfatiza-se, que quanto maior o I_g , mais prioritário é o lote g (ou seja, mais cedo deve ser colocado em produção).

Na Equação 22, o peso w_g é representado pelo número de clientes do lote H_{Ag} , já p_g é obtido pela soma em minutos do tempo das tarefas do lote g transformado em dias (para transformar em dias, o tempo deve ser dividido por 528, que é a quantidade de minutos trabalhados por dia). O valor de K_p é 100 e foi determinado a partir da definição proposta por Pinedo (2012).

$$I_g = \frac{w_g}{p_g} \exp\left(-\frac{\max(d_g - p_g - t, 0)}{K_p}\right) \times v_g \times \alpha_g \quad (22)$$

A proposta acrescenta os parâmetros v_g e α_g , onde v_g prioriza os lotes em que a quantidade em produção V_g esteja em conformidade com a quantidade vendida Q_{Ag} , de acordo com a Equação 23. O valor ótimo da Equação 24 é alcançado quando a quantidade vendida do produto for igual ou maior que a quantidade em produção, ou seja, a empresa não perde tempo produzindo produtos para alimentar o estoque quando esse não é necessário.

$$v_g = \begin{cases} \frac{Q_{Ag}}{V_g}, & \text{se } Q_{Ag} < V_g \\ 1, & \text{se } Q_{Ag} \geq V_g \end{cases} \quad (23)$$

O parâmetro α_g privilegia os lotes em que o produto em produção atenda ao maior número de clientes e é calculado a partir da razão entre a quantidade de clientes para produto relacionado ao lote H_{A_g} e a quantidade total de clientes O , conforme exibido na Equação 24.

$$\alpha_g = \frac{H_{A_g}}{O} \quad (24)$$

Enfatiza-se que iniciar a produção dos lotes na sequência recomendada pela regra proposta não garante que o término dos lotes acontecerá na mesma ordem, pois os lotes são enviados para serem processados em linhas de produção com capacidades distintas. Para manter os lotes na sequência correta, no decorrer da otimização, a Equação 13 foi inserida nos objetivos do AGMO. A Equação 13 melhora à medida que os lotes com maior valor de I_g , calculado na Equação 25, terminem antes.

O desempenho do sequenciamento pode ser avaliado a partir da influência dos parâmetros adicionados na regra ATC, que deu origem à nova regra ATC-BS. O parâmetro v_g tem o objetivo de priorizar os lotes em que a quantidade de peças em produção esteja de acordo com a quantidade de peças vendidas. Na prática, o parâmetro tem a finalidade de melhorar o despacho, uma vez que a produção irá priorizar os lotes que estejam completamente vendidos, sem investir tempo em lotes que não serão entregues.

O indicador de remessa é calculado a partir do somatório da sobra (quantidade em produção menos as vendas), multiplicada pela diferença entre o *makespan* e o momento de finalização de processamento dos lotes. A Equação 25 descreve o cálculo do indicador, no qual V_g informa a quantidade de peças em produção no lote g , e Q_{A_g} representa a quantidade de peças vendidas para o lote, $Max(C_{j,g,i,l,o})$ retorna o momento de fim da última tarefa do lote e $Max(C_{j,g',i,l,o})$ representa *makespan*.

$$\sum_{g=1}^q \left((V_g - Q_{A_g}) \times (Max(C_{j,g,i,l,o}) - Max(C_{j,g',i,l,o})) \right) \quad \forall (j, g', i, l, o) \mid (g' \in \{1 \dots q\}),$$

$$(V_g > Q_{A_g}) \quad (25)$$

O parâmetro α_g adicionado na regra ATC tem a função de privilegiar os lotes que atendam ao maior número de clientes. Para examinar o desempenho do parâmetro, a Equação 26 calcula o somatório do número de clientes do lote (H_{A_g}), dividido pelo momento de conclusão do lote ($Max(C_{j,g,i,l,o})$); quanto maior o número de clientes atendidos no menor tempo, maior o valor do indicador de clientes.

$$\sum_{g=1}^q \left(\frac{H_{A_g}}{Max(C_{j,g,i,l,o})} \right) \quad \forall (j, i, l, o) \quad (26)$$

3.3 ETAPA 3 – BALANCEAMENTO

Nas proposições deste estudo, o balanceamento foi executado com base na heurística RPW, proposta originalmente por Helgeson e Birnie (1961). A operacionalização da RPW consiste no cálculo do peso posicional de cada tarefa, de acordo com o diagrama de precedência, no qual o peso é calculado pela soma do tempo de cada tarefa com o tempo das tarefas que a antecedem. Os pesos de cada posição devem ser organizados em ordem decrescente e as tarefas atribuídas às estações de trabalho segundo a ordem do peso posicional, respeitando-se restrições de precedência e tempo de ciclo (CHAVARE; MULLA, 2015).

Antes de executar o balanceamento da linha de produção, é necessário definir quais recursos cada operador deve manipular de acordo com a demanda dos recursos referentes aos lotes atribuídos à linha de produção e o número de operadores disponíveis. Para distribuir os recursos entre os operadores é necessário calcular a *cota* de cada recurso, que representa a porcentagem do tempo necessário de um operador para executar todas as tarefas atribuídas a um recurso i , em uma

linha de produção l ($Cota_{i,l}$) e serve de base para determinar quais recursos cada operador deve manipular.

A Equação 27 descreve o cálculo da $Cota_{i,l}$, no qual a soma do tempo de todas as tarefas dos lotes atribuídos à linha de produção l e processados no recurso i ($\sum p_{j,A_g,i}$), deve ser dividida pela razão entre a soma do tempo de todas as tarefas dos lotes atribuídos à linha de produção l ($\sum p_{j',A_{g'},i'}$) e o número de operadores da linha W_l , para todos os lotes atribuídos a linha de produção $G_{g,l} = 1$ e todos os recursos da linha de produção $m_{i,l} > 0$.

$$Cota_{i,l} = \frac{\sum p_{j,A_g,i}}{\left(\frac{\sum p_{j',A_{g'},i'}}{W_l}\right)} \quad \forall (j, j', g, g', i, i', l) \mid (j' \in \{1 \dots J_g\}), (g' \in \{1 \dots q\}),$$

$$(i' \in \{1 \dots z\}), G_{g,l} = 1, m_{i,l} > 0 \quad (27)$$

Se a $Cota_{i,l}$ representa a porcentagem de ocupação de um operador no recurso i na linha de produção l para uma distribuição de lotes, então a soma das cotas de todos os recursos (z) da linha de produção deve ser igual ao número de operadores da linha de produção (W_l), conforme exibido na Equação 28. Assim, se a cota do recurso i for maior que a ocupação de um operador, será necessário mais de um recurso i na linha l ($m_{i,l} > 1$) para processar as tarefas desse recurso. Se a linha de produção l não dispuser da quantidade de recursos i necessários, o operador que manipular esse recurso em falta ficará com a ocupação maior que a dos demais operadores da linha, gerando um problema de desbalanceamento.

$$\sum_{i=1}^z Cota_{i,l} = W_l \quad (28)$$

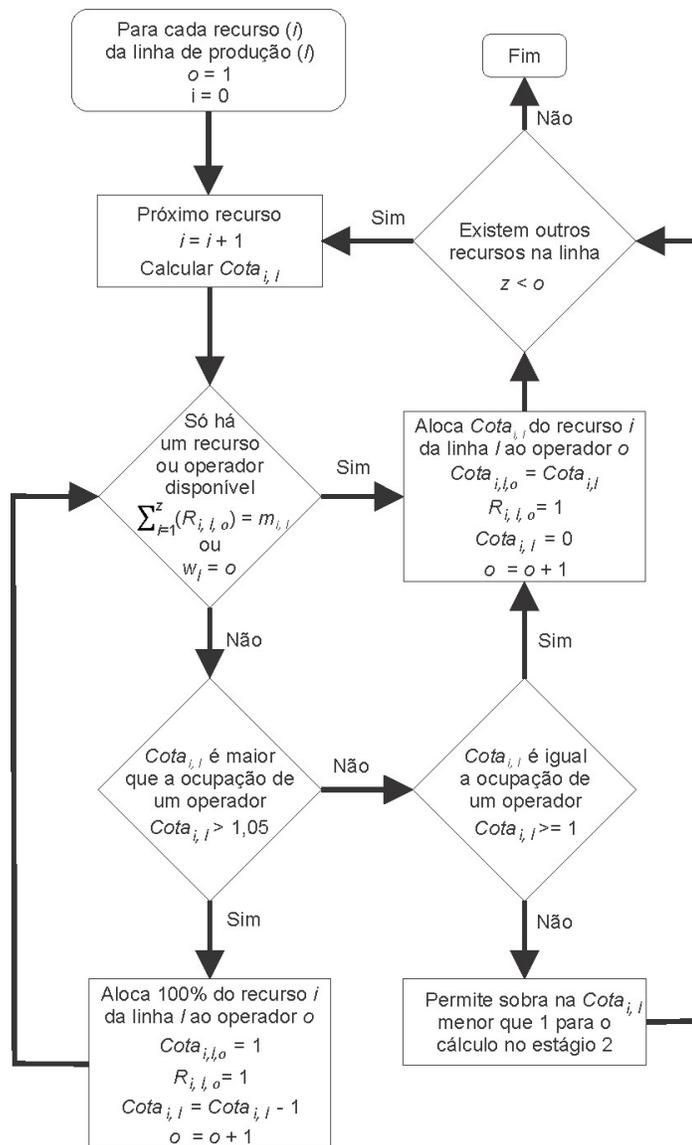
Antes de efetuar o balanceamento é necessário definir quais recursos i cada operador o irá manipular através da distribuição da $Cota_{i,l}$ entre os operadores da linha de produção (W_l), respeitando a quantidade de equipamentos da linha ($m_{i,l}$), e de maneira que a soma da cota de cada operador o da linha de produção l seja

próximo a 1 ($\sum_{i=1}^Z (Cota_{i,l,o}) \cong 1$), que representa a ocupação total de um operador no período.

Para calcular a *cota* de cada operador *o* no recurso *i* da linha de produção *l* ($Cota_{i,l,o}$) é necessário seguir dois estágios. O primeiro estágio é responsável por subtrair da $Cota_{i,l}$ os recursos com ocupação igual ou superior à ocupação de um operador ($Cota_{i,l,o} \cong 1$), e o cálculo deve seguir os passos definidos no fluxograma da Figura 18.

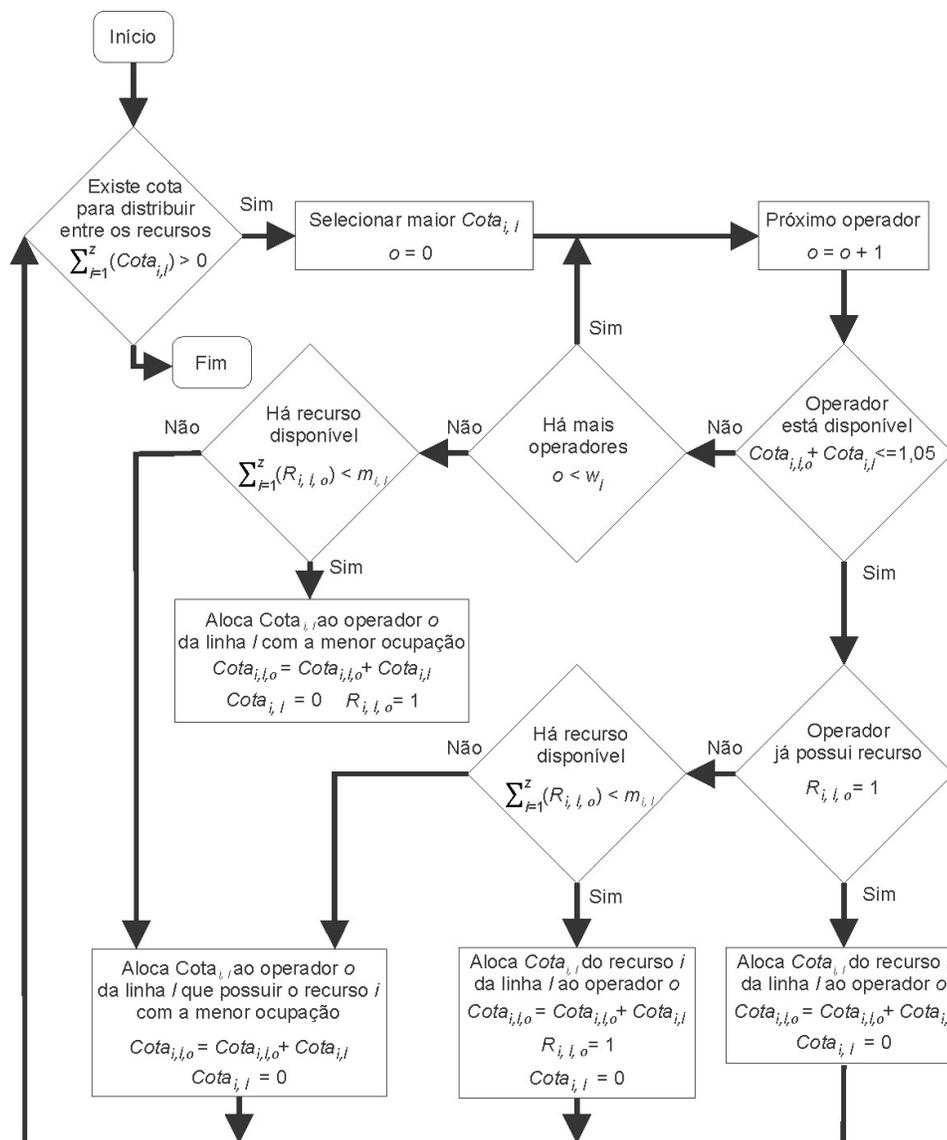
A heurística atual utilizada no chão de fábrica impede, sempre que possível, que um recurso seja alocado a um operador com ocupação inferior a 5%, e tem como objetivo reduzir o número de recursos necessários e a movimentação do operador na linha de produção; essa lógica foi incorporada no primeiro estágio do cálculo.

Figura 18 – Fluxograma do primeiro estágio do cálculo da cota



O segundo estágio (Figura 19) é responsável por distribuir a parte fracionária da $Cota_{i,l}$, ou seja, os recursos com ocupação percentual menor que um operador ($Cota_{i,l} < 1$), no qual diferentes recursos são atribuídos ao mesmo operador. O procedimento aloca inicialmente as cotas maiores, pois no início da distribuição os operadores estão menos ocupados e os espaços maiores são mais comuns. Caso a $Cota_{i,l}$ não se encaixe em nenhum operador da linha de produção, ela é atribuída ao operador com menor ocupação.

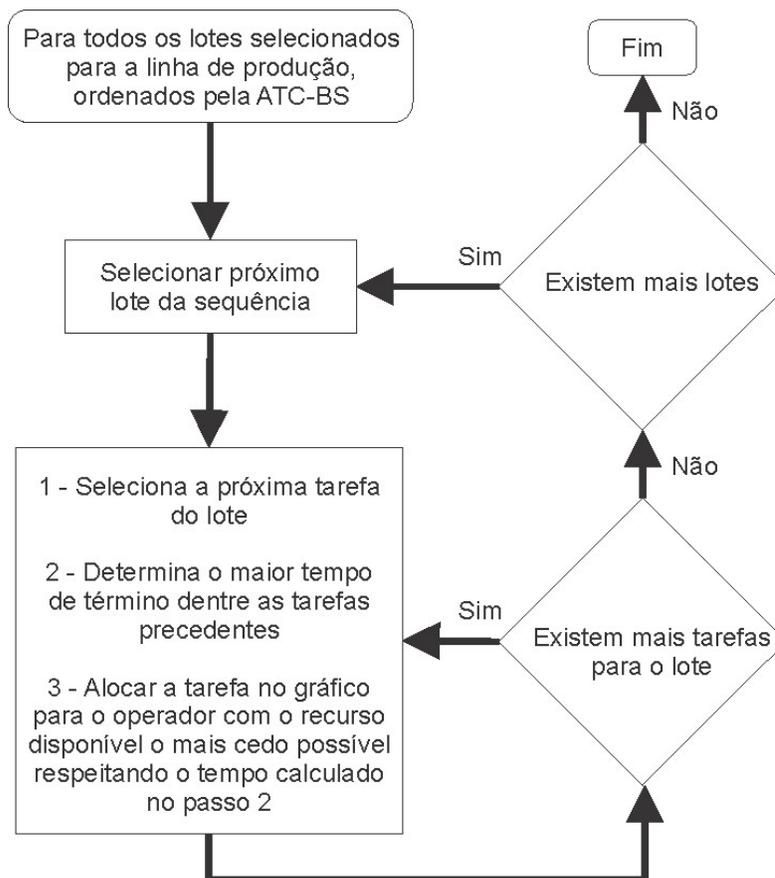
Figura 19 – Fluxograma do segundo estágio do cálculo da cota



Após definir os recursos que cada operador irá manipular, o balanceamento é obtido ordenando os lotes pela regra de sequenciamento ATC-BS e submetendo ao processo de agendamento no gráfico de Gantt, descrito no fluxograma da Figura 20. Neste, o primeiro lote é selecionado e a primeira tarefa é estabelecida por meio da ordem do peso posicional da tarefa no diagrama de precedência obtida pela aplicação da RPW. A tarefa selecionada é então alocada no gráfico de Gantt, com tamanho proporcional ao tempo da tarefa multiplicada pela quantidade de produtos do lote e encaixada no operador/recurso que esteja disponível o mais cedo possível, de maneira que não ocorra conflito com outras tarefas e seja respeitada a precedência. A alocação das tarefas se repete até que todas as tarefas do lote

estejam desenhadas e o próximo lote é então selecionado. O processo se repete enquanto existirem lotes a serem distribuídos.

Figura 20 – Fluxograma elaboração gráfico de Gantt



O desempenho do balanceamento depende da quantidade de recursos e operadores da linha de produção em que o lote foi direcionado, portanto é função do algoritmo de otimização favorecer a distribuição que conduza ao melhor balanceamento para as linhas internas de produção.

3.4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

O experimento foi realizado no setor do vestuário, no qual o Brasil possui a maior cadeia produtiva do Ocidente, produzindo desde fibras até a confecção, o que representa uma enorme participação na economia nacional. No ano de 2016 ocupou a quarta posição entre os maiores produtores mundiais de artigos do vestuário, faturando 126 bilhões de reais, reunindo mais de 33 mil empresas com mais de 5 empregados, com cerca de 1,5 milhão de empregos diretos (o que equivale a 14,6% do total de trabalhadores alocados na produção industrial) e 8 milhões de empregos indiretos (IEMI, 2016; FINDES, 2017).

O setor distribuiu um total de 18,5 bilhões em salários, com 9,2 bilhões de peças produzidas ao ano, o que representa 5,8% do valor total faturado da indústria de transformação (PIMENTEL, 2016). Segundo dados do FINDES (2017), no Espírito Santo o setor está representado por 1.286 empresas, as quais empregam 14.776 pessoas, e os principais polos estão localizados nos municípios de Colatina, 23%; Vila Velha, 22%; São Gabriel, 16%; e Cachoeiro de Itapemirim, com 8%.

O polo de Colatina possui, aproximadamente, 345 empresas (3% grandes e 97% micro e pequenas), e produz, anualmente, 30 milhões de peças. Segundo Bianco, Oliveira e Silva (2005), muitas das pequenas empresas existem apenas em razão de serem facionistas (prestadoras de serviços às grandes empresas) e a concentração geográfica e setorial dos produtores permite que eles tenham facilidade de acesso a determinados fatores que são facilitadores à competição, dito de outro modo, a grande concentração de prestadores de serviços do vestuário na região permite que as grandes empresas tenham vantagens em relação ao custo e tempo de produção.

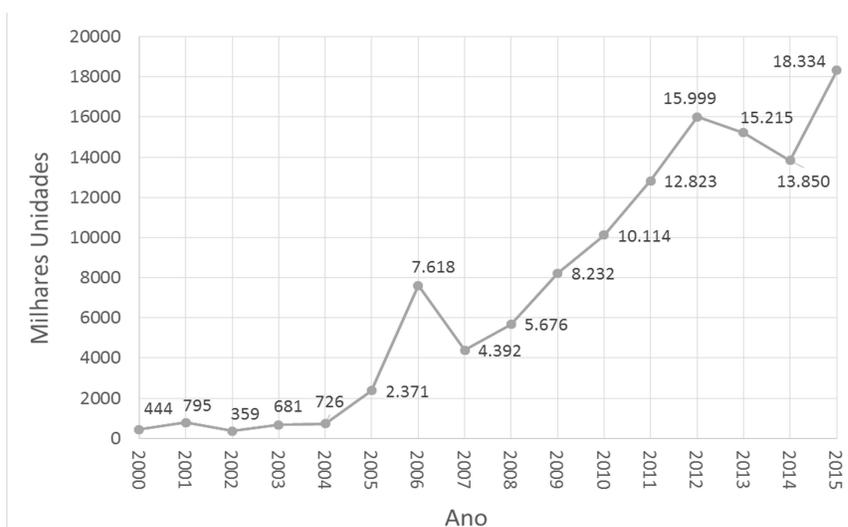
No Brasil, até a década de 1980, a indústria do vestuário se desenvolveu com a proteção do governo, desse modo, suas atividades produtivas eram voltadas ao mercado nacional, com pouca concorrência e imunes a produtos estrangeiros. No Espírito Santo, a indústria passou a ganhar destaque na economia regional a partir da década de 1970, quando ocorreu uma intensificação do processo industrial e maior diversificação da estrutura produtiva, simultaneamente a um rápido processo de urbanização (FINDES; BANDES; SEBRAE, 1996).

No início da década de 1990 houve a abertura do mercado brasileiro às importações, trazendo ao Brasil produtos importados com preços baixos, com os

quais as mercadorias nacionais não conseguiam concorrer, forçando às empresas nacionais a se reestruturarem. Além da abertura do mercado, outros fatores prejudicaram a indústria nacional do vestuário, como o Acordo Multifibras (AMF, de 1974 a 1994), que estabeleceu quotas sobre as exportações de países em desenvolvimento para países desenvolvidos e o Acordo sobre Têxteis e Vestuário (ATV, de 1995 a 2004), cujo objetivo foi eliminar gradativamente o sistema de quotas impostas aos países em desenvolvimento e integrar o comércio de artigos têxteis às regras da Organização Mundial do Comércio (OMC). Assim, no ano de 2005 passou a vigorar a liberalização no comércio mundial do setor têxtil (FINDES, 2017).

Com a liberalização no comércio mundial do setor têxtil, as importações de produtos do vestuário cresceram cerca de 25 vezes nos últimos 10 anos, e a situação é mais preocupante quando a análise é feita na importação de produtos do vestuário em malha, que cresceram mais de 41 vezes nos últimos 15 anos. A Figura 21 mostra o crescimento nas importações de produtos do vestuário em malha e reafirma a influência da liberação mundial do setor têxtil em 2005, ano que ocorreu um crescimento de mais de 321% no volume de importação.

Figura 21 – Evolução anual da importações de vestuário em malha

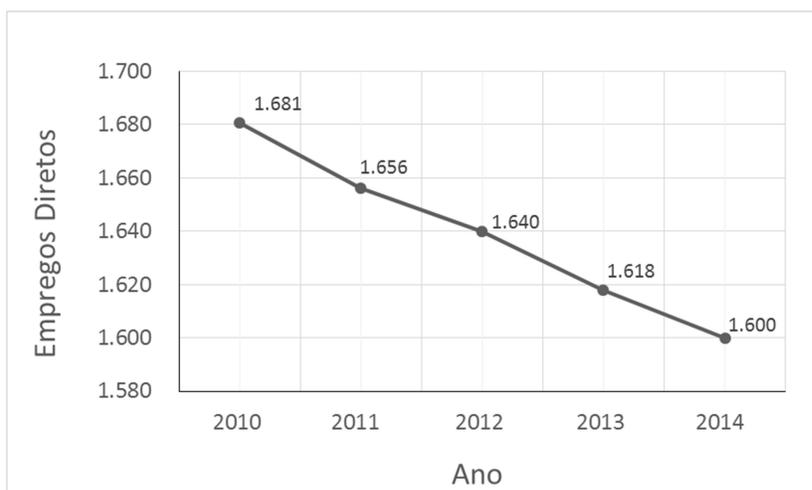


Fonte: Aliceweb (2016).

Segundo Pimentel (2016), com o aumento das importações a produção na indústria do vestuário vem caindo nos últimos anos, tendo em vista que o varejo vem substituindo, paulatinamente, os produtos nacionais por importados; como resultado, o saldo na balança comercial em 2015 foi de -4,75 bilhões de dólares, para produtos

do vestuário. O aumento nas importações pode estar relacionado à redução dos empregos no setor, que, nos últimos 5 anos, apresentou uma redução de quase 100 mil postos de trabalho, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 22.

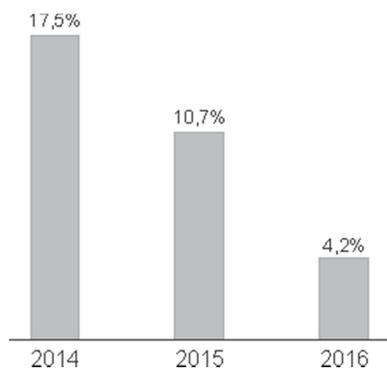
Figura 22 – Empregos diretos setor vestuário



Fonte: adaptada de Pimentel (2015).

Uma consequência do aumento da concorrência diz respeito à redução da lucratividade do setor, que vem diminuindo a cada ano e está apresentada no gráfico da Figura 23, que revela uma perda de 76% na lucratividade, no período de 2014 a 2016 (FINDES, 2017).

Figura 23 – Evolução da lucratividade na indústria do vestuário



Fonte: Findes (2017).

Como implicação, em todo o Brasil esse efeito resultou no fechamento de, aproximadamente, 3.667 empresas do vestuário, no período de 2011 a 2015. No Espírito Santo, onde a pesquisa foi aplicada, tal efeito pôde ser percebido a partir

das 61 empresas fechadas e dos 4.767 empregos perdidos no mesmo período, com evidência para 2014, ano que ocorreu uma redução de mais de 17% no setor (FINDES, 2017).

Segundo diagnóstico publicado pela ABIT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO, 2013), a indústria do vestuário foi afetada por problemas estruturais e conjunturais da economia brasileira, entre os quais se destacam o longo período de apreciação da moeda nacional, os custos elevados de energia, o estado precário de portos e rodovias e a burocracia enfrentada pelas empresas. Esses fatores prejudicam a competitividade do setor e dificultam a capacidade de enfrentar a concorrência de importações, sobretudo, da Ásia, que se beneficiam de mão de obra barata e dos inúmeros subsídios concedidos aos seus exportadores, em especial, a China.

3.4.1 Fase de Costura

Incentivado pelas características do polo, o setor do vestuário de Colatina tem terceirizado parte da produção no intuito de lidar com a sazonalidade da demanda e flexibilizar o processo produtivo. No setor, o foco da terceirização é da fase de costura, que é a mais crítica do processo produtivo (CHEN et al., SILVA; FLORENÇO, 2013), favorecendo a terceirização, uma vez que necessita de pouco investimento em recursos e exige a maior parte da mão de obra consumida no setor, sendo considerada o gargalo de todo o processo produtivo (SILVA, 2013).

O elevado consumo de mão de obra, aliado ao aumento desproporcional dos salários, tornou os operadores recursos escassos e o conceito de operadores treinados em mais de uma máquina (operadores polivalentes) passou a ser fundamental, no sentido de aproveitar melhor a mão de obra e aumentar o desempenho das linhas de produção (AZADEH et al., 2010).

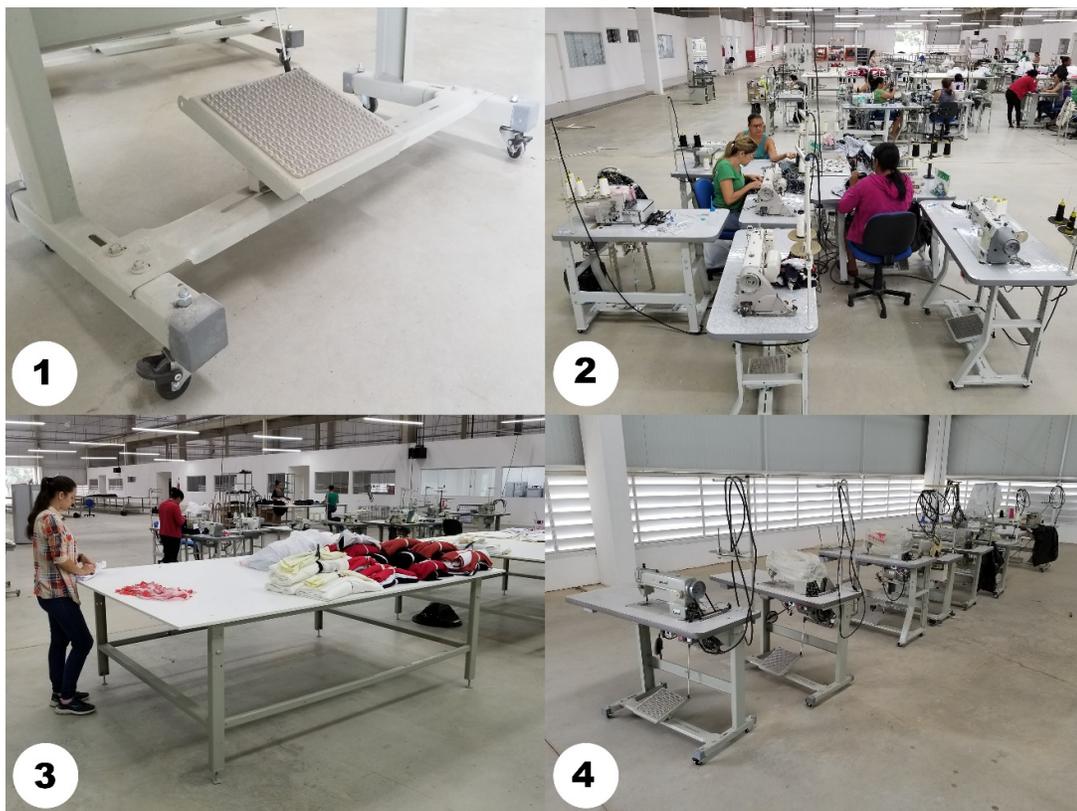
As linhas de produção são constituídas por estações de trabalho e cada uma dessas estações é formada por máquinas (recursos) e operadores (CHEN et al., 2012). Na costura, para tornar as linhas de produção mais flexíveis, os recursos são instalados sobre suportes com rodas, conforme demonstrado na Figura 24-1, o que facilita a movimentação dos recursos e a alteração do *layout*.

O *layout* das linhas de produção é elaborado conforme a demanda de recursos necessários para produzir os lotes. Assim, os recursos possuem suportes

com rodas para facilitar a movimentação e o posicionamento próximo aos operadores, conforme demonstrado na Figura 24-2, que apresenta uma disposição composta por operadores que manipulam mais de um recurso.

O coordenador de produção deve determinar quais recursos cada operador deve manipular, a fim de que seja possível distribuir as tarefas dos lotes entre os operadores. Desse modo, o auxiliar de produção deve posicionar os recursos próximos aos operadores, separar os lotes e movimentar os materiais necessários para produção entre as estações de trabalho durante a execução, conforme demonstrado na Figura 24-3. É comum, em linhas de produção menores, um funcionário assumir a função de coordenador e de auxiliar ao mesmo tempo.

Figura 24 – Costura na indústria do vestuário



Para permitir que a linha de produção se adapte à produção de uma grande variedade de modelos, cada linha de produção mantém um conjunto de recursos extras prontos para serem utilizados, como exibido na Figura 24-4. Os modelos que cada linha de produção pode produzir são determinados segundo os tipos de

recursos presentes na linha, nesse sentido, quanto maior a diversidade de recursos, maior a variedade de modelos a linha estará apta a fabricar.

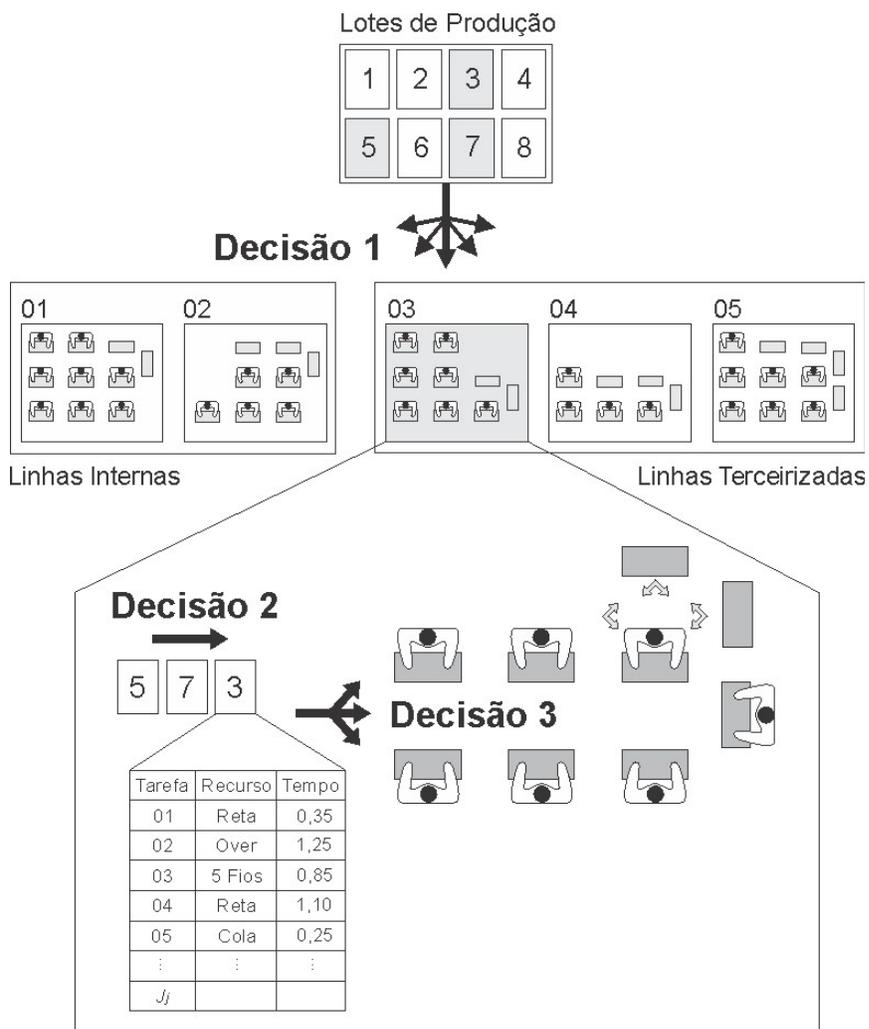
Para Tomastik e Liu (1996), existem dois problemas para serem resolvidos na alocação de lotes a linhas de produção: o primeiro consiste em definir que número de recursos e operadores deve ser alocado em cada linha de produção, considerando as famílias de produtos que cada linha de produção deve ser capaz de processar, bem como as limitações de operadores e recursos. O segundo problema consiste em alocar as tarefas de cada lote nas estações de trabalho de forma balanceada, respeitando a sequência de processamento e os níveis de habilidade dos operadores. Como o tempo para processar um lote de produção depende da quantidade de recursos atribuídos à linha de produção, o segundo problema está completamente vinculado ao primeiro.

Geralmente, as linhas de produção na costura são adaptadas para atender uma diversidade de produtos, como consequência, há em cada linha de produção um conjunto de recursos extras, o que permite uma rápida adaptação aos novos produtos. Por esse motivo, o trabalho considera que o número de operadores e recursos são fixos.

Para Tubino (2009), são necessárias três decisões no processo de sequenciamento em lotes. A primeira decisão é selecionar a linha de produção em que o lote será processado; a segunda consiste em determinar a sequência em que os lotes serão executados; e a terceira define os recursos da linha de produção que serão usados no processamento. Para demonstrar as decisões dentro do contexto da indústria do vestuário, um exemplo fictício da distribuição de 8 lotes em 5 linhas de produção foi elaborado e apresentado na Figura 25. Segundo o exemplo, na decisão 1 é necessário escolher a linha de produção interna ou terceirizada em que o lote será processado, considerando que a linha de produção deve possuir todos os recursos necessários para executar as tarefas do lote. No exemplo, os lotes 3, 5 e 7 foram direcionados para a linha de produção externa 3.

A decisão 2 define a sequência com que os lotes serão processados em cada linha de produção, com base na quantidade e data de entrega dos pedidos que o lote atende. A sequência estabelecida para execução dos lotes, no exemplo, foi 5, 7 e 3, respectivamente.

Figura 25 – Produção em lotes na costura com opção de terceirização



Apresentada a sequência de processamento dos lotes, a decisão 3 determina como deve ser realizada a distribuição das tarefas de cada lote entre os recursos e operadores da linha de produção, respeitando a precedência das tarefas, a habilidade dos operadores e o tempo de processamento. Na decisão 3, a distribuição das tarefas dos lotes entre as estações de trabalho, de forma que o tempo de ociosidade do homem e das máquinas seja minimizado, é caracterizado como um problema de balanceamento (KUMAR; MAHTO, 2013).

As decisões necessárias na fase de costura englobam problemas de alocação, sequenciamento e balanceamento e a análise simultânea de vários objetivos, seja para manter as linhas de produção internas ocupadas durante um

horizonte de programação, melhorar a ocupação dos operadores, seja para melhorar a entrega aos clientes. Essas decisões são consideradas problemas *NP-hard* pela literatura (DE GIOVANNI; PEZZELLA, 2010; ZIAEE, 2013; NADERI; AZAB, 2014; LU, 2015; ZIAEE, 2017), necessitando a utilização de heurísticas de otimização para resolução do problema de forma aproximada.

3.5 RESULTADOS

A pesquisa foi realizada com o apoio da PW Brasil Export SA, que é a maior indústria de vestuário do estado do Espírito Santo, com 416 funcionários e uma produção média de 40 mil peças mensais, das quais 28% da produção é realizada internamente e 72% em empresas terceirizadas. É detentora de duas marcas (Vide Bula e Missbella), ambas seguem as tendências da moda confeccionando coleções dinâmicas, com grande variedade de tecidos e processos de fabricação. Essa característica impossibilita a padronização dos produtos, o que impede a fabricação em massa, exigindo que as empresas trabalhem com lotes de fabricação pequenos e grande variação nos processos produtivos.

Em cada marca, a empresa lança três coleções anuais (Verão, Auto-verão e Inverno), com cerca de 330 produtos cada, o que resulta em uma produção anual para as duas marcas de 1.980 diferentes produtos. Mensalmente, a empresa processa, aproximadamente, 280 lotes com 62 tarefas cada; destas, 35 pertencem à costura, tida como a fase mais crítica e foco do estudo.

A empresa dispõe de duas linhas internas de produção na costura, uma com 12 e outra com 13 operadores. As linhas de produção operam em um turno diário de 528 minutos trabalhados, as quais, unidas, oferecem 13.200 minutos por dia (o que representa, em média, a confecção de 578 produtos). A capacidade externa de costura é 16,12 vezes maior que a interna, com 403 operadores divididos entre as 91 linhas de produção terceirizadas, o que permite oferecer 212.784 minutos por dia, o que representa, em média, a confecção de 9.313 produtos.

A capacidade de processamento das linhas de produção está diretamente relacionada ao número de operadores e à quantidade de cada tipo de recurso que a linha de produção possui. O processo de produção na costura demanda 29 diferentes tipos de recursos distribuídos entre as linhas de produção internas e terceirizadas, conforme Tabela 1. Uma descrição detalhada da quantidade de cada

tipo de recurso e o número de operadores em cada uma das 93 linhas de produção pode ser encontrada no Apêndice A.

Tabela 1 – Lista de Recursos

Recurso	Interno (un.)	Terceirizado (un.)
2 Agulha larga	10	2
2 Agulhas	16	101
2 Agulhas estreitas	8	7
3 Agulhas	4	4
3 Fios	13	82
4 Fios	4	43
5 Fios	12	77
Caseadeira	4	3
Chuliadeira	2	10
Colarete	10	70
Embutir calça	2	0
Esteira	6	2
Ferro a vapor	8	2
Fitadeira (Overlok)	2	2
Galoneira	2	5
Maq. de braço	7	6
Maq. de passar cóis	8	5
Maq. de pregar botão	6	5
Maq. ponto corrente	2	2
Mosqueadeira	8	4
Plaina	4	4
Pregar braguilha	2	0
Pregar passante	2	0
Prença	6	0
Prespontadeira	2	0
Reta	24	318
Topper	4	0
Travete	4	3
Zig-zag	2	7
	184	764

Atualmente, a empresa trabalha com um horizonte de programação de 15 dias, e cada período contém, em média, 140 lotes de produção, os quais devem ser fabricados dentro do horizonte observando indicadores de qualidade de entrega, tempo de produção e ocupação das linhas de produção internas.

A programação deve distribuir os lotes entre as linhas de produção, de maneira que as linhas de produção internas permaneçam completamente ocupadas no período; o excedente da capacidade interna deve ser enviado às linhas de produção terceirizadas. Dentro das linhas de produção, as tarefas dos lotes devem ser organizadas para aproveitar ao máximo a mão de obra, respeitando a precedência das tarefas e a disponibilidade de operadores e recursos. Mesmo diante desse desafio, atualmente, as empresas do vestuário não empregam nenhuma

ferramenta para auxiliar no processo de decisão, fazendo com que a sistemática proposta sirva como uma alternativa para apoiar as empresas diante desse desafio.

O modelo de simulação elaborado reproduz a execução dos lotes no ambiente de produção que possui 438 operadores e 948 recursos repartidos entre as 93 linhas de produção. Esse modelo processou os dados de uma amostra referente ao histórico de seis meses de produção (janeiro a junho de 2016), dividido em 12 horizontes quinzenais de programação, cada um contendo os lotes fabricados no período pela empresa, a linha de produção e a ordem de execução.

Nesse período, a empresa contava com duas linhas internas de produção da costura e, apesar de os dados coletados descreverem corretamente o momento de término e a linha de produção em que os lotes foram processados, as informações sobre as linhas internas de produção não estavam consoantes à realidade. Constatou-se que os lançamentos eram realizados no sistema em uma das linhas de produção, porém no chão de fábrica a distribuição se alterava. Para permitir a comparação de forma justa, um procedimento de distribuição das ordens foi implementado para os lotes produzidos internamente, de modo que as linhas de produção ficassem com a carga proporcional ao número de operadores (aproximando, desta forma, as condições reais de operação das linhas analisadas).

O resumo da amostra dos dados coletados está apresentado na Tabela 2, que descreve a demanda em lotes que devem ser concluídos no decorrer dos dias úteis de cada planejamento quinzenal, juntamente com o número de tarefas, a quantidade de produtos, o tempo em minutos necessários para produzir os lotes e a demanda convertida em dias necessários para produzir internamente os lotes de cada período. A partir dos dados da Tabela 2 é possível confirmar a necessidade de terceirização de parte da produção, pois a demanda de tempo ultrapassa a capacidade interna em diversos períodos, chegando a 2,5 vezes a capacidade interna na segunda quinzena de fevereiro. Na segunda quinzena de abril e na primeira quinzena de junho, a capacidade de produção foi maior do que a demanda do período, o que resulta em ociosidade nas linhas de produção internas, mesmo que a produção seja executada exclusivamente nelas.

Tabela 2 – Lotes por horizonte de programação

Horizonte de Programação	Lotes (un.)	Tarefas (un.)	Quantidade de produtos (un.)	Demanda em minutos	Dias úteis do horizonte	Dias para produzir internamente
JAN-1	131	4561	11497	265433	10	20,11
JAN-2	125	4374	11465	269971	10	20,45
FEV-1	107	3630	8284	187135	9	14,18
FEV-2	244	8169	17004	363180	11	27,51
MAR-1	226	7495	13659	287367	11	21,77
MAR-2	169	5704	11530	244465	11	18,52
ABR-1	105	3484	8885	186390	11	14,12
ABR-2	79	2784	4368	101708	8	7,71
MAI-1	176	6055	8911	206970	10	15,68
MAI-2	109	3842	9416	224158	10	16,98
JUN-1	91	3284	4666	124705	10	9,45
JUN-2	117	4009	7689	191281	11	14,49
	1679	57391	117374	2652763	122	200,97

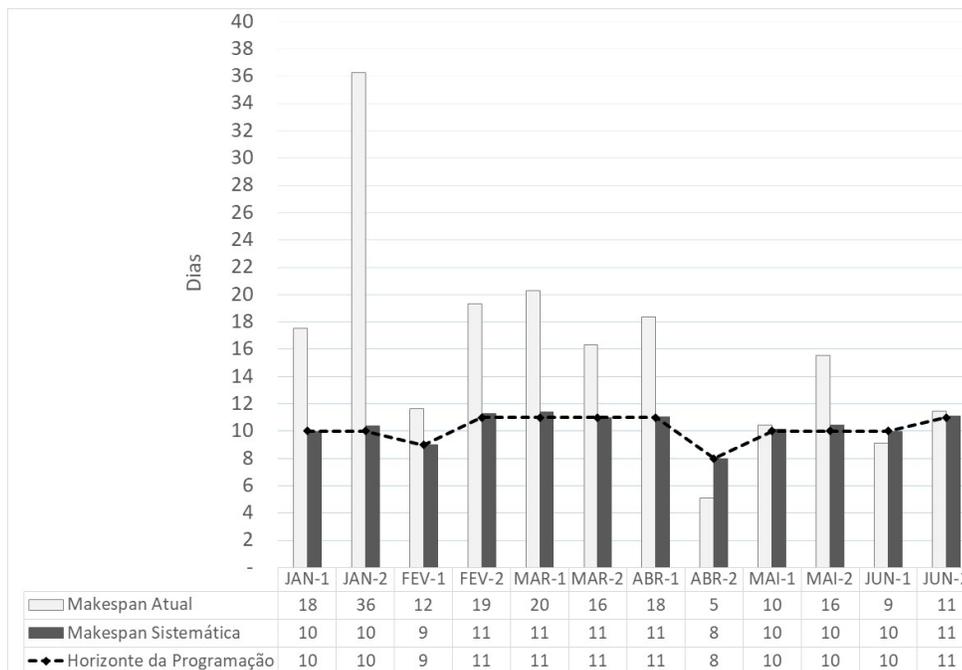
Os dados coletados foram submetidos à sistemática e o planejamento resultante foi comparado com o planejamento atual realizado na empresa por meio das informações fornecidas pela execução no modelo de simulação. Para avaliar especificamente o resultado do sequenciamento via ATC-BS, o resultado obtido na sistemática proposta foi comparado ao efetuado na empresa e ao resultado obtido pela aplicação da regra de sequenciamento ATC nos lotes.

As informações coletadas no modelo de simulação permitiram confrontar o *makespan* obtido na sistemática com o atual da empresa e compará-los com o momento de término do horizonte da programação. Essa comparação é importante, pois se o *makespan* for maior que o término do horizonte de programação, haverá atraso ou um custo adicional em horas extras. Em contrapartida, se o *makespan* for inferior ao período de programação, ocorrerá ociosidade nos operadores e um custo adicional, caso existam lotes que tenham sido encaminhados à terceirização embora houvesse capacidade interna para fabricá-los.

A Figura 26 compara o planejamento sugerido pela sistemática e o planejamento atual realizado na empresa para os 15 dias da programação (somente os dias úteis do período são computados). Fica evidente o melhor desempenho obtido pela sistemática na alocação dos lotes, vez que a ocupação em dias é exatamente igual ao horizonte quinzenal em todos os períodos. Já a sistemática atualmente utilizada para programação conduz a resultados de baixa qualidade (note que, com exceção da primeira quinzena de maio, o curso de ação atualmente utilizado obteve um *makespan* diferente para todos os períodos). Na segunda quinzena de abril e na primeira quinzena de junho, o *makespan* do planejamento

atual foi inferior ao período de planejamento, enquanto nos demais períodos o *makespan* foi maior que o horizonte, chegando a mais 3,6 vezes na segunda quinzena de janeiro.

Figura 26 – Horizonte de programação em dias



A eficiência alcançada na distribuição dos lotes pela sistemática pode ser examinada pela diferença média de 107,72 minutos entre o momento de término dos períodos de planejamento e do *makespan* da sistemática. Como a média de tempo necessário para fabricar um lote é de, aproximadamente, 1.579,96 minutos, conclui-se que não seria possível alocar ou retirar um lote de produção nos planejamentos efetuados pela sistemática, comprovando, assim, sua eficiência em abastecer as linhas de produção dentro do horizonte de programação.

A eficácia no uso da mão de obra interna pode ser avaliada pela média de ocupação de 97,13%, obtida pela aplicação da sistemática, alcançando o melhor resultado de 98,80% na segunda quinzena de janeiro e o pior resultado, de 94,84% na primeira quinzena de junho, período em que a demanda foi inferior à capacidade, o que justifica o resultado inferior. Em uma comparação da ocupação média dos operadores das linhas de produção internas entre o planejamento sugerido pela sistemática e o planejamento atual, exibido na Figura 27, fica evidente a eficiência

da ocupação dos operadores alcançada pela sistemática proposta em detrimento à metodologia atual.

Figura 27 – Média de ocupação por operador da Sistemática x Atual



Financeiramente, o resultado da ocupação pode ser mensurado a partir da ocupação média de 97,13%, obtido pela sistemática em relação à ocupação atual de 54,44%, que corresponde a uma diferença de 42,69%. Considerando que no período foram trabalhados 122 dias, em turnos de 528 minutos, com 25 operadores, nas duas linhas internas de produção, a redução de 42,69% corresponde a 687.479,76 minutos. Assumindo que o tempo economizado foi terceirizado a um custo de R\$ 0,44 centavos/minuto, a aplicação da sistemática resultaria em uma economia de R\$ 302.491,10, se considerar somente a ociosidade da distribuição atual da empresa.

Ainda em termos financeiros, a distribuição realizada pela sistemática obteve uma redução de R\$ 45.340,08 no custo interno e R\$ 154.643,62 na terceirização em relação à metodologia atual, supondo o custo interno de R\$ 0,35 centavos/minuto. No entanto, a metodologia atual permitiu uma ociosidade interna de 377.119,06 minutos, o que equivale a R\$ 131.991,67 desperdiçados da mão de obra interna. Além da redução do custo de produção, percebeu-se ainda uma redução de 67,55

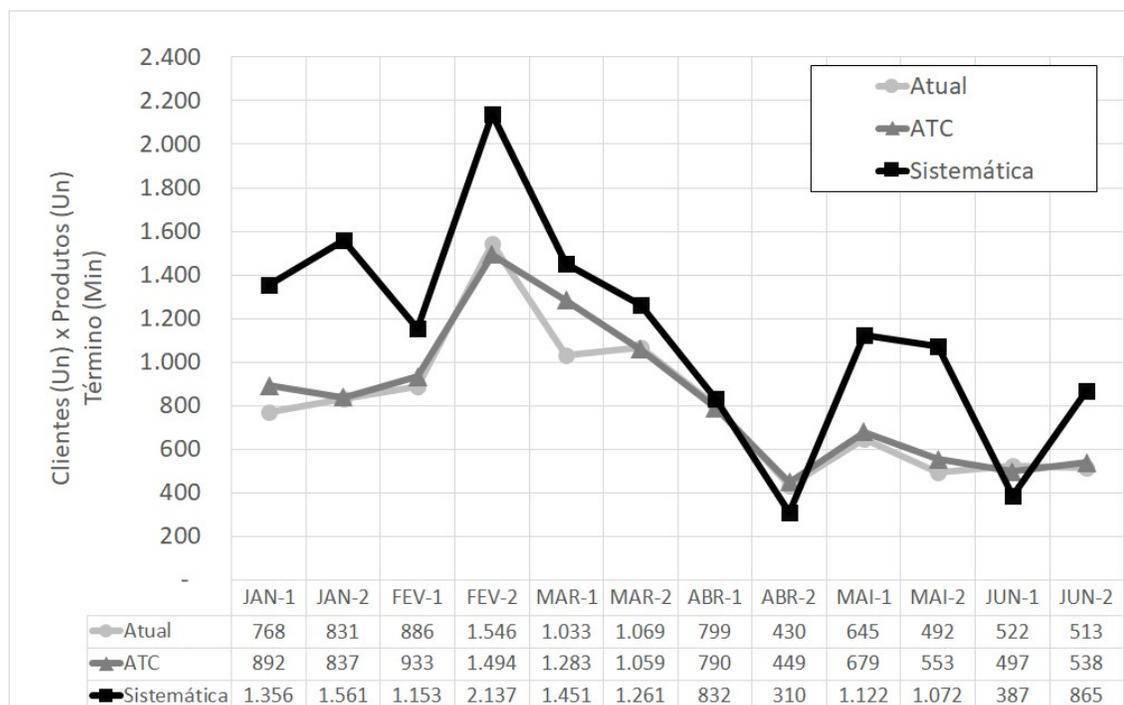
dias ao comparar o makespan da sistemática em relação à metodologia atual usada na empresa.

A eficiência da ocupação dos operadores deve ser alcançada em harmonia com a qualidade de entrega ao cliente, que melhora à medida que maior quantidade de produtos é entregue ao maior número de clientes no menor tempo possível (calculada na Equação 12). Para avaliar o desempenho da entrega, a sistemática foi comparada à metodologia atual da empresa e ao planejamento resultante do sequenciamento dos lotes do planejamento atual da empresa pela regra ATC. A aplicação da regra de sequenciamento ATC-BS conduziu a uma melhora de 39,76% no índice de entrega definido na Equação 12 em relação ao planejamento executado atualmente na empresa, e 25,95% melhor que a sequência gerada pela regra ATC.

No término do horizonte de programação a sistemática proposta fabricou 7.047 produtos a mais que a sistemática atual e 6.925 que a ATC. Considerando o preço médio dos produtos faturados de R\$ 97,00, a sistemática permitiu uma antecipação de faturamento de aproximadamente R\$ 683.559,00 e R\$ 671.725,00 respectivamente. Outro benefício alcançado foi a redução de 444,03 minutos no tempo médio de produção dos produtos em relação à sistemática atual e 401,35 minutos em relação a ATC.

A comparação do índice de entrega entre as metodologias nos períodos é exibida na Figura 28. Percebe-se que a sistemática obteve um desempenho superior em todos os períodos, com exceção da segunda quinzena de abril e a primeira de junho. Esse resultado pode ser explicado a partir do volume de 0,33% da produção terceirizado pela sistemática, comparado aos 48,67% pela metodologia atual e a ATC, que além da terceirização desnecessária ocasionou uma ociosidade de 50.269,50 minutos nos períodos ABR-2 e JUN-1, conforme ilustrado na Figura 26. Em contrapartida, nesses dois períodos um total de 109.438,66 minutos (executados externamente pela metodologia atual e pela ATC) passou a ser executado internamente, fornecendo uma economia de R\$ 47.879,41.

Figura 28 – Desempenho do índice de entrega



Por fim, o comportamento do indicador de remessa pode ser visualizado na Tabela 3, na qual o desempenho da sistemática foi 272,59% melhor que o atualmente executado pela empresa, e 187,10% melhor que a regra de sequenciamento ATC.

Tabela 3 – Indicadores de entrega

Método	Indicador de remessa	Indicador de clientes
Sistemática	14.914,49	510,41
Atual	40.654,82	498,55
ATC	27.904,67	409,32

O resultado comprova a importância do parâmetro para que a empresa produza os lotes que estão de acordo com a quantidade vendida, reduzindo o tempo investido na produção de lotes que têm estocagem como destino (antecipação de produção) e não favorecem a entrega. A Tabela 3 demonstra em conjunto o desempenho do indicador de clientes, no qual a sistemática atual foi 24,7% melhor que a regra ATC e 2,38% melhor que a metodologia atual.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No mercado globalizado, as empresas têm sido pressionadas a reavaliar suas estratégias básicas de produção em decorrência de crescente demanda por produtos com ciclos de vida mais curtos e pequenos lotes de produção. Neste contexto, percebe-se a necessidade do emprego de processos produtivos capazes de se adaptarem rapidamente à produção de novos produtos, bem como às variações na demanda. Como resposta, as indústrias têm adotado a contratação de empresas terceirizadas para produzir parte da produção com o intuito de suportar as variações na demanda. Ao mesmo tempo, têm transformado suas linhas de produção em linhas de produção flexíveis, utilizando equipamentos menos especializados, usualmente manipulados por operadores polivalentes. As decisões nesse ambiente de produção são complexas e estão correlacionadas, porém são tratadas, atualmente, de forma isolada na literatura.

Esta tese apresentou uma sistemática integrada para alocação, sequenciamento e balanceamento de lotes entre múltiplas linhas de produção com operadores polivalentes. Dentre suas contribuições, destacam-se: (i) a integração entre a alocação, o sequenciamento e o balanceamento das tarefas em um ambiente de produção com operadores polivalentes; (ii) a proposição original da regra ATC-BS (alteração proposta na regra de sequenciamento ATC), que prioriza a produção dos lotes em que a venda esteja em conformidade com a produção e que atendam ao maior número de clientes; (iii) o novo operador de mutação guiada, que promove alterações no cromossomo de maneira a beneficiar a ocupação das linhas de produção internas e reduzir o desvio do horizonte de programação; (iv) nova heurística de balanceamento e alocação de recursos aos operadores em linhas de produção com recursos extras e operadores polivalentes, fundamentada na ocupação percentual dos operadores nos recursos ($Cota_{i,l,o}$) e inspirada na heurística RPW.

A sistemática foi aplicada em uma amostra de seis meses, divididos em horizontes quinzenais de programação de uma indústria do vestuário no Espírito Santo. Obteve-se a redução do *makespan* em 67,55 dias, atingindo uma ocupação média dos operadores internos de 97,13%, o que resultou em uma economia de R\$ 45.340,08 no custo interno e R\$ 154.643,62 no custo de terceirização.

Ademais dos resultados da produção, a sistemática obteve melhores resultados na entrega, a partir da aplicação da nova regra de sequenciamento ATC-BS, que priorizou lotes (i) com maior quantidade em produção, (ii) que atendessem ao maior número de clientes no menor tempo, e (iii) que a venda estivesse de acordo com a produção. Esses fatores trazem vários benefícios: (i) favorecem o aumento do número de clientes atendidos; (ii) incrementa o volume de produtos entregues; (iii) reduz o tempo de armazenamento no estoque; (iv) melhora a eficiência da entrega, à medida que reduz o tempo desperdiçado, produzindo lotes que atendam ao estoque e não serão despachados imediatamente.

Apesar de a sistemática ser aplicada em uma empresa do setor do vestuário, ela pode ser estendida para outros setores industriais com características semelhantes, como calçados e metalmecânica. Um aspecto importante do algoritmo de otimização (NSGAI) que auxilia na adaptação da sistemática é a facilidade de remoção e adição de novos objetivos em sua formulação. Essa propriedade facilita a adaptação da sistemática a outros setores e a peculiaridades de cada empresa.

Desse modo, este estudo pode ser ampliado em várias direções. Uma extensão poderia considerar a análise de tempos estocásticos ou uma variação na eficiência de operadores e linhas produtivas. Uma análise interessante seria avaliar o impacto das paradas não programadas de maquinário e da assiduidade dos operadores. Seria relevante, ainda, adequar a sistemática para tratar ambientes de produção com mais de uma linha de produção interna e que compartilhem os mesmos recursos durante o processo produtivo. Nesse ambiente, a alocação dos recursos aos operadores deve ser feita mediante a análise da disponibilidade dos recursos compartilhados.

Durante a distribuição dos lotes, a sistemática seleciona as empresas terceirizadas de acordo com os recursos que ela possui, porém algumas empresas apresentam critérios diferentes de seleção. Algumas analisam a pontualidade da terceirizada, o custo minuto, a distância e até o índice de retrabalho e defeito. Uma extensão da sistemática seria a adição de critérios mais elaborados para a escolha da empresa terceirizada. Por fim, uma variante do trabalho poderia considerar cenários nos quais se verificam variações de preço entre as terceirizadas ou diferenças no custo de transporte, justificando a adição de um objetivo para redução do custo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Estudo prospectivo setorial: têxtil e confecção*. Brasília, DF: ABDI, 2010. (Série Cadernos da Indústria ABDI, v. 18).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. *Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira. Cenários, desafios, perspectivas e demandas*. Brasília, DF: ABIT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. *O Poder da moda: Cenários, Desafios e Perspectivas*. Agenda de Competitividade da Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira 2015 a 2018. Brasília, DF: ABIT, 2015.
- ADRIANA, G.; COSMIN, D. Globalization and the Competitiveness of the European Textile and Clothing Industry. *Annals of the University of Oradea, Economic Science Series*, p. 119-120. 2015.
- ALICEWEB. *O Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior (Alice Web)*. Disponível em: <<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2016.
- AZADEH, A. et al. Optimal Allocation of Operators in a Cellular Manufacturing System by an Integrated Computer Simulation-Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Operational Research*, p. 1745-7653, 2010.
- BAKER, K. R.; TRIETSCH, D. T. *Principles of Sequencing and Scheduling*. New Jersey: JohnWiley & Sons, 2009.
- BAUTISTA, J. B.; PEREIRA, J. P. A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, n. 194, p. 787-794, 2009.
- BAYBARS, I. B. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, v. 32, n. 1, p. 909-932, 1986.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, p. 694-715, 2006.
- BEHNAMIAN, J.; FATEMI GHOMI, S. M. A survey of multi-factory scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 231-249, 2016.
- BERTRAND, J. W.; SRIDHARAN, V. Study of simple rules for subcontracting in make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research*, p. 509-531, 2001.
- BIANCO, M. D.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, D. F. *Tecnologias de gestão e arranjos produtivos: uma análise da rede de empresas do setor de vestuário no município de Colatina: ENEGEP*, 2005.

- BOYSEN, N. B.; FLIEDNER, M. F.; SCHOLL, A. S. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, p. 674-693, 14 dez. 2006.
- BOYSEN, N. B.; FLIEDNER, M. F.; SCHOLL, A. S. Assembly line balancing: Which model to use when? *Int. J. Production Economics*, p. 509-528, 7 mar. 2008.
- BRAHIM, R. et al. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, p. 83-94, 2002.
- BRUCKER, P. B. *Scheduling Algorithms*. 5. ed. Springer, 2007.
- CACHON, G. P.; HARKER, P. T. Competition and Outsourcing with Scale Economies. *Management Science*, p. 1314-1333, 2002.
- CHAN, F. T.; CHUNG, S. H.; CHAN, P. L. An adaptive genetic algorithm with dominated genes for distributed scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, v. 29, n. 2, p. 364-371, 2005.
- CHANG, H.-C.; LIU, T.-K. Optimisation of distributed manufacturing flexible job shop scheduling by using hybrid genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 1973-1986, 2015.
- CHAVARE, K. B.; MULLA, A. M. Application of Ranked Position Weighted (RPW) Method for Assembly Line Balancing. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, p. 254-262, 2015.
- CHEN, J. C. et al. Assembly line balancing in garment industry. *Expert Systems with Applications*, p. 10073-10081, 2012.
- CHEN, Z. L.; LI, C. L. Scheduling with subcontracting options. *IIE Transactions*, p. 1171-1184, 2008.
- CHOI, B. C.; CHUNG, J. Two-machine flow shop scheduling problem with an outsourcing option. *European Journal of Operational Research*, p. 66-72, 2011.
- CHOI, B.-C.; PARK, M.-J. Outsourcing decisions in m-machine permutation flow shop scheduling problems with machine-dependent processing times. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2014.
- CHUNG, D. Y.; CHOI, B. C. Outsourcing and scheduling for two-machine ordered flow shop scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, p. 46-52, 2013.
- CHUNG, D. et al. A new approach to job shop scheduling problems with due date constraints considering operation subcontracts. *International Journal of Production Economics*, p. 238-250, 2005.

- CHUNG, S. H. et al. Application of genetic approach for advanced planning in multi-factory environment. *International Journal of Production Economics*, v. 127, n. 2, p. 300-308, 2010.
- COELLO, C. A.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. 2. ed. Springer, 2007.
- DE GIOVANNI, L. D.; PEZZELLA, F. P. An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 2, p. 395-408, 2010.
- DEB, K. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. New York: John Wiley & Sons, LTD., 2009.
- DEB, K. D. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.
- DETTY, R.; YINGLING, J. Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: a case study. *International Journal of Production Research*, p. 429-445, 2000.
- DIAS, A. H.; VASCONCELOS, J. A. Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 38, n. 2, p. 1133-1136, 2002.
- DIAS, L. M. *A Informação Imprecisa e os Modelos Multicritério de Apoio a Decisão*. Coimbra, 2000.
- DIMITRIS, M. D.; MICHALIS, D. M. Decentralized manufacturing systems review: Challenges and outlook. *Logistics Research*, v. 5, n. 3-4, p. 113-121, 2012.
- EL-BOURI, A. A cooperative dispatching approach for minimizing mean tardiness in a dynamic flowshop. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 7, p. 1305-1314, 2012.
- FAZLOLLAHTABAR, H.; HAJMOHAMMADI, H.; ES'HAGHZADEH, A. A heuristic methodology for assembly line balancing considering stochastic time and validity testing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 311-320, 2011.
- FINDES, F. D. Análise de Competitividade do Setor da Indústria de Café do Estado do Espírito Santo. *Instituto de Desenvolvimento Educacional e Industrial do Espírito Santo – Ideies*, 2017.
- FINDES; BANDES; SEBRAE. *Competitividade da indústria do Vestuário Capixaba*. Vitória: [s.n.], 1996.
- FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Journal Evolutionary Computation*, v. 3, n. 1, p. 1-16, 1995.

FUJITA, R. M.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil : uma perspectiva histórica e cultural. *Moda Palavra e-periódico*, v. 15, n. 8, p. 91-105, jan. 2015.

GARCIA, G. et al. Linhas de montagem : revisão da literatura e oportunidades para pesquisas futuras. *Produção*, p. 170-182, 2015.

GAREY, M.; JOHNSON, D.; SETHI, R. The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, v. 1, n. 2, p. 117-129, 1976.

GEN, M.; LIN, L. Multiobjective evolutionary algorithm for manufacturing scheduling problems: State-of-the-art survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 25, n. 5, p. 849-866, 2014.

GHOSH, S. A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems. *International Journal of Production Research*, p. 637-670, 1989.

GOMES, L. F.; ARAYA, M. C.; CARIGNANO, C. C. *Tomada de Decisões em Cenários Complexos*. São Paulo: Cengage Learning, 2003.

GOMES, L. F.; GOMES, C. F.; ALMEIDA, A. T. *Tomada de Decisão Gerencial*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GRAEML, A. R.; PEINADO, J. *Administração da Produção*. Curitiba: UnicenP, 2007.

GRAHAM, R. L. et al. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, v. 5, p. 287-326, 1979.

HEAVEY, C.; KHANIAN, S. M. Development of a process model simulator. *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 13-33, jul. 2002.

HEIZER, J. H.; RENDER, B. R. *Administração de Operações*. 5. ed. São Paulo: LTC, 2001.

HELGESON, W.; BIRNIE, D. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, p. 334-338, 1961.

HEVNER, A. R. et al. Design Science in Information Systems Research. *Management Information Systems*, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HORN, J. H.; NAFPLIOTIS, N. N.; GOLDBERG, D. E. A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, v. 1, n. 1, p. 82-87, 1994.

HU, S. J. Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization. *Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013*. Michigan: Elsevier, 2013. p. 3-8.

IEMI. *Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira*. São Paulo: Gráfica Mundo, 2016.

- JIA, H. J. et al. Integration of genetic algorithm and Gantt chart for job shop scheduling in distributed manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, v. 53, n. 2, p. 313-320, 2007.
- KANGBOK , L.; BYUNG-CHEON, C. Two-stage production scheduling with an outsourcing option. *Production, Manufacturing and Logistics Two-stage*, p. 489-497, 2011.
- KO, J. K.; HU, S. J. Balancing of manufacturing systems with complex configurations for delayed product differentiation. *International Journal of Production Research*, p. 4285-4308, 2008.
- KUMAR, N.; MAHTO, D. Assembly Line Balancing: A Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application. *Global Journal of Researches in Engineering*, v. 13, n. 2, p. 29-50, 2013.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- LAW, A.; MCCOMAS, M. Simulation-Based Optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE - IEEE, 2000.
- LEE, I.; SUNG, C. Single machine scheduling with outsourcing allowed. *International Journal of Production Economics*, p. 623-634, 2008.
- LEE, K.; CHOI, B. C. Two-stage production scheduling with an outsourcing option. *European Journal of Operational Research*, p. 489-497, 2011.
- LEITÃO, P. L. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 22, n. 7, p. 979-991, 2009.
- LEWIS, R.; PAECHTER, B.; ROSSI-DORIA, O. *Evolutionary Scheduling*. Berlin: Springer, 2007.
- LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013.
- LIU, F. et al. Machine scheduling with outsourcing. *The International Journal of Logistics Management*, p. 133-159, 2014.
- LIU, Q. et al. Novel multi-objective resource allocation and activity scheduling for fourth party logistics. *Computers and Operations Research*, p. 42-51, 2014.
- LIU, T. K.; CHEN, Y.-P.; CHOU, J.-H. Solving Distributed and Flexible Job-Shop Scheduling Problems for a Real-World Fastener Manufacturer. *IEEE Access*, v. 2, p. 1598-1606, 2015.
- LU, H. L. et al. A chaotic non-dominated sorting genetic algorithm for the multi-objective automatic test task scheduling problem. *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 1, p. 2790-2802, 2013.

- LU, P. H. et al. A genetic algorithm embedded with a concise chromosome representation for distributed and flexible job-shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 1-16, 2015.
- MARTINO, L. M.; PASTOR, R. P. Heuristic procedures for solving the general assembly line balancing problem with setups. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 1, p. 1787-1804, 2010.
- MOHAN, M.; GANESAN, K.; SURESH, R. An Optimal Balancing Of Multiple Assembly Line For A Batch Production Unit. *International Journal of Lean Thinking*, p. 22-32, 2013.
- MOKHTARI, H.; ABADI, I. N. Scheduling with an outsourcing option on both manufacturer and subcontractors. *Computers and Operations Research*, p. 1234-1242, 2013.
- MOURTZIS, D. M. et al. Supply chain modeling and control for producing highly customized products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 57, n. 1, p. 451-454, 2008.
- MOURTZIS, D.; DOUKAS, M. Decentralized manufacturing systems review: challenges and outlook. *Logistics Research*, p. 113-121, 2012.
- NADERI, B.; AZAB, A. Modeling and heuristics for scheduling of distributed job shops. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 17, p. 7754-7763, 2014.
- NASSIRNIA, P. N.; TAP, M. M. Strategies to Achieve Labor Flexibility in the Garment Industry. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, v. 7, n. 4, 2010.
- NGUYEN, S. et al. A computational study of representations in genetic programming to evolve dispatching rules for the job shop scheduling problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 17, n. 5, p. 621-639, 2013.
- PARK, J.; BAE, H.; DINH, T.-C. Operator allocation in cellular manufacturing systems by integrated genetic algorithm and fuzzy data envelopment analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 465-478, 2014.
- PIMENTEL, F. *Setor Têxtil e de Confecção Momento Atual e Agenda de Trabalho*. Belém: ABIT, 2016. Disponível em:
<<http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/economia/20160204/producao-setor-vestuario-cai-2015-informa-abit/340390>>. Acesso em: 30 ago. 2016.
- PIMENTEL, F. V. *Relatório de Atividades ABIT 2015*. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, 2015.
- PINEDO, M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 4. ed. Springer, 2012.
- PONNAMBALAM, S.; ARAVINDAN, P.; NAIDU, G. M. A comparative evaluation of assembly line balancing Heuristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 577-586, 1999.

PONNAMBALAM, S. G.; ARAVINDAN, P. A.; NAIDU, G. M. A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, n. 1, p. 341-352, 2000.

PRADO, D. S. *Teoria da filas e da simulação*. Belo Horizonte: Ed. de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

QI, X. Coordinated logistics scheduling for in-house production and outsourcing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, p. 188-192, 2008.

QI, X. Outsourcing and production scheduling for a two-stage flow shop. *International Journal of Production Economics*, p. 43-50, 2011.

QI, X. Two-stage production scheduling with an option of outsourcing from a remote supplier. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, p. 1-15, 2009.

REGINATO, G.; ANZANELLO, M. J.; KAHMANN, A. Mixed assembly line balancing method in scenarios with different. *Gestão e Produção*, 2015.

REN, J. A supplying chain scheduling with subcontracting and delivery. *Advances and Applications in Discrete Mathematics*, p. 445-452, 2016.

SARKER, B. S.; PAN, H. P. Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers & industrial engineering*, v. 34, n. 3, p. 609-628, 1998.

SCHOLL, A. *Balancing and sequencing assembly lines*. Darmstadt Technical, 1999.

SCHOLL, A. S.; BECKER, C. B. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, p. 666-693, sept. 2006.

SHAFIGH, F.; DEFERSHA, F. M.; MOUSSA, S. E. A linear programming embedded simulated annealing in the design of distributed layout with production planning and systems reconfiguration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1119-1140, 2017.

SILVA, A. *A Indústria do Vestuário: Procedimentos Básicos na Terceirização da Costura*. Convibra, 2013.

SILVA, A.; FLORENÇO, I. L. *A Indústria do vestuário: procedimentos para o ganho de produtividade no setor de costura*. Convibra, 2013.

SILVA, G. G.; TUBINO, D. F.; SEIBEL, S. Assembly lines: existing work and avenues for future research. *Produção*, 2015.

SILVEIRA, G.; BORENSTEIN, D.; FOGLIATTO, F. S. Mass customization: Literature review and research directions. *Production Economics*, p. 1-13, 2000.

SIMARIA, A. S.; VILARINHO, P. V. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, v. 40, jan. 2002.

SIVASANKARAN, P.; SHAHABUDEEN, P. Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1665-1694, 2014.

SLACK, N. S.; CHAMBERS, S. C.; JOHNSTON, R. J. *Administração da Produção*. 3. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2009.

SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study. *International Journal of Production Economics*, p. 191-199, 2007.

SRINIVAS, N. S.; DEB, K. D. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Journal of Evolutionary Computation*, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

SU, M.; ROMANOWSKI, R. Multicontextual dispatching rules for job shops with dynamic job arrival. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 1-4, p. 19-33, 2013.

SUN, X. S.; NOBLE, J. S. An Approach to Job Shop Scheduling with Sequence-Dependent Setups. *Journal of Manufacturing System*, v. 18, n. 6, p. 416-430, 1999.

SUN, X. T.; CHUNG, S. H.; CHAN, F. T. Integrated scheduling of a multi-product multi-factory manufacturing system with maritime transport limits. *Transportation Research*, n. 79, p. 110-127, 2015.

TASAN, S. O.; TUNALI, S. A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 49-69, 2008.

TAVARES NETO, R. F.; GODINHO FILHO, M. An ant colony optimization approach to a permutational flowshop scheduling problem with outsourcing allowed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 1286-1293, 2015.

TOMASTIK, R. N.; LIU, G. Scheduling flexible manufacturing systems for apparel production. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996.

TUBINO, D. F. *A Produtividade no Chão de Fábrica*. Porto Alegre: Bookman 1999.

TUBINO, D. F. *Planejamento e Controle da Produção*. São Paulo: Atlas, 2009.

UDDIN, M. K.; SOTO, M. C.; LASTRA, J. L. An integrated approach to mixed-model assembly line balancing and sequencing. *Assembly Automation*, p. 164-172, 2010.

- VIANNA, D. S.; PULINI, I. C.; MARTINS, C. B. *Using Multiobjective Genetic Algorithm and Multicriteria Analysis for the Production Scheduling of a Brazilian Garment Company*. InTech, 2013.
- VICKSON, R. Choosing the job sequence and processing times to minimize total processing plus flow cost on a single machine. *Operations research*, p. 1155-1167, 1980.
- WANG, G.; LEI, L. Polynomial-time solvable cases of the capacitated multi-echelon shipping network scheduling problem with delivery deadlines. *International Journal of Production Economics*, p. 263-271, 2012.
- WANG, L. et al. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 132-144, 2009.
- WEBSTER, M.; ALDER, C.; MUHLEMANN, A. Subcontracting within the supply chain for electronics assembly manufacture. *International Journal of Operations & Production Management*, p. 9-10, 1997.
- WIENDAHL, H. P. et al. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, n. 2, p. 783-809, 2007.
- WU, X. et al. Genetic algorithms for integrating cell formation with machine layout and scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, p. 277-289, 2007.
- ZHANG, S. et al. An Extended Genetic Algorithm for Distributed Integration of Fuzzy Process Planning and Scheduling. *Mathematical Problems in Engineering*, p. 13, 2016.
- ZHANG, W.; GEN, M. Process planning and scheduling in distributed manufacturing system using multiobjective genetic algorithm. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, p. 62-72, 2010.
- ZHONG, W.; HUO, Z. Single machine scheduling problems with subcontracting options. *Journal of Combinatorial Optimization*, p. 489-498, 2013.
- ZHU, G.; BARD, J. F.; YU, G. A two-stage stochastic programming approach for project planning with uncertain activity durations. *Journal of Scheduling*, p. 167-180, 2007.
- ZIAEE, M. A heuristic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem. *The Journal of Supercomputing*, v. 67, n. 1, p. 69-83, 2013.
- ZIAEE, M. Modeling and solving the distributed and flexible job shop scheduling problem with WIPs supply planning and bounded processing times. *International Journal of Supply and Operations Management*, p. 78-89, 2017.

ZITZLER, E. Z.; THIELE, L. T. Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 3, n. 4, p. 257-271, 1999.

APÊNDICE A – Linhas de produção

Linha de Produção	Número de Operadores	2 Agulha larga	2 Agulhas	2 Agulhas estreitas	3 Agulhas	3 Fios	4 Fios	5 Fios	Caseadeira	Chulleadeira	Colarete	Embutir calça	Esteira	Ferro a vapor	Fitadeira (Overflok)	Galoneira	Maq. de braço	Maq. de passar cós	Maq. de pregar botão	Maq. ponto corrente	Mosqueadeira	Platina	Pregar barguilha	Pregar passante	Prença	Prespontadeira	Reta	Sem equipamentos	Topper	Travete	Zig-zag	
1	2	1				1	1				1																2					
2	2	1				1																						2				
3	1						1				1																1					
4	3					1					1																2				1	
5	2	1						1		1	1																2					
6	4						2				1																3					
7	2	1				1																					2					
8	2					1					1																2					
9	2	1				1																					2					
10	2	1						1		1																	2					
11	2	1				1		1			1																2					
12	12	1					3										4										6					
13	2	1				1		1			1																2					
14	2					1					1																2					
15	12	3	8	4	2	5	2	4	2	1	5	1	3	4	1	1	2	4	3	1	3	2	1	1	3	1	11	1	2	2	1	
16	13	7	8	4	2	8	2	8	2	1	5	1	3	4	1	1	5	4	3	1	5	2	1	1	3	1	13	1	2	2	1	
17	2					1	1				1																2					
18	2	1				2		1			1																2					
19	3	1				1		1																			3					
20	4					2	2				2																4					
21	14	2				1	1	3			1							2	1		2						8					
22	2	1				1																					2					
23	2	1				1		1											1			1					2					
24	2						1				2																2					
25	4	1				1		1			1																2					
26	2						2				1																2					
27	2	1				1																					2					
28	2	1						1		1	1																2					
29	2					1					1																2					
30	2	1				1		1			1																2					
31	1						1				1																1					
32	2	1				1		1			1																2					
33	4	1				1	1	1			2																3					
34	25	4	1	1		1	1	2		1	1																20			1		
35	2	1				1																					2					
36	2					1	1				1																2					
37	2	1				1		1			1																2					
38	2	1				1																					2					
39	15	3				2	1	2			1																11					
40	3	1				1																					2					
41	1					1					1																1					
42	2	1				1		1			1																2					
43	4	1				1		1			1																2					
44	1					1	1																				1					
45	2	1						1	1		1																2					
46	2	1				1		1			1																2					

Linha de Produção	Número de Operadores	2 Agulha larga	2 Agulhas	2 Agulhas estreitas	3 Agulhas	3 Fios	4 Fios	5 Fios	Caseadeira	Chuleadeira	Colarete	Embutir calça	Esteira	Ferro a vapor	Fitadeira (Overflok)	Galoneira	Maq. de braço	Maq. de passar cóis	Maq. de pregar botão	Maq. ponto corrente	Mosqueadeira	Plaina	Pregar barguilha	Pregar passante	Prença	Prespontadeira	Reta	Sem equipamentos	Topper	Travete	Zig-zag
47	12	3			1	1	2			1																	8				
48	2				1																						2				
49	3				1	1					2																2				
50	3				1						1																3				
51	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	
52	2	1			1																						2				
53	12	1	3	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	1	1		
54	4	1			1	1				1																2					
55	15	1				4	2				3							1	1							9		1			
56	3	1			1																					2					
57	3	1			1	1																				3					
58	2	1					1				1															2					
59	7				3	2					2															5					
60	3					2					1															2					
61	2	1			2		1				1															2					
62	2	1					2		1																	2					
63	2	2					1																			2					
64	7	2			1	1	1			1																8					
65	4	1			1	1	1				1															3					
66	2	1			2		1				1															2					
67	1					1					1															2					
68	2	1			1	1	1			1																2					
69	5	1			1	1	2				2															4					
70	2	1			1																					2					
71	2	1			1																					2					
72	2				1						1															2					
73	1					1					1															1					
74	2	1			1	1					1															2					
75	2	1			1	1					1															2					
76	6	2			1	2					1															6					
77	2	1					1																			2					
78	2	1			1	1					1															2					
79	3	1			1	1																				3					
80	1					1										1										1					
81	2	1			1	1	1				1															2					
82	4	1			2	1	1									2										3					
83	2	1					1				1															2					
84	3				1						2															3					
85	4	1	1		1	1																	1			3					
86	4	1					1		1	1																3					
87	40	12	1	1	4	2	8		1	1																25			1		
88	25	5	1	1	2	2	4		1	1																21			1		
89	4	1			1	1					1															3					
90	2	1			1																					2					
91	4	1			1	1																				3					
92	2	1			1																					2					
93	25	7	1	1	2	1	3		1	1																16			1		

APÊNDICE B – Planilha de entrada

Recursos		
Contém uma relação de todos os recursos disponíveis		
Nome da Aba:	Recursos	
Coluna	Significado	Tipo
idTipoRecurso	Código único do recurso	Inteiro
tipoRecurso	Descrição do Recurso	Char(30)

Linhas		
Contém uma relação de todos os recursos disponíveis		
Nome da Aba:	Linhas	
Coluna	Significado	Tipo
Grupo	Nome da Linha de Produção	Char(30)
qtdeOperadores	Numero de Operadores	Inteiro
Interno	"1" Indica que a linha é interna "0" indica que é externo	Char(1)

Recursos por Linha de Produção		
Contém uma relação de recursos dentro de cada linha de produção		
Nome da Aba:	RecursosLinhas	
Coluna	Significado	Tipo
Grupo	Nome da Linha de Produção	Char(30)
tipoRecurso	Tipo do Recurso produtivo	Char(20)
Qtde	Quantidade de recursos presente na linha	Inteiro

Lotes de Produção		
Relação de lotes de produção (Lotes)		
Nome da Aba:	Jobs	
Coluna	Significado	Tipo
idordemproducao	Código único da ordem de produção (Lote)	Inteiro
venda	Quantidade de vendas realizadas para o lote	Inteiro
QtdeOriginal	Quantidade de peças em produção no lote	Inteiro
Cientes	Quantidade de clientes que o lote atende	Inteiro
Entrega	Média de dias para entrega do lote, calculados a partir de cada pedido	Inteiro

Tarefas por lote de produção		
Relação de tarefas a serem executadas por lote de produção		
Nome da Aba:	TarefasJobs	
Coluna	Significado	Tipo
idordemproducao	Código único da ordem de produção (Lote)	Inteiro
tiporecurso	Tipo do Recurso produtivo	Char(20)
tempo	Tempo de processamento	Decimal
idordemfase	Código da etapa de produção	Inteiro
idoperacao	Código da operação a ser realizada	Inteiro
DtFim	Não preencher	
HoraFim	Não preencher	

Operações		
Relação de operações que podem ser executadas		
Nome da Aba:	Operacoes	
Coluna	Significado	Tipo
idOperacao	Código único da operação a ser realizada	Inteiro
Operacao	Descrição da operação	Char(40)

Operações		
Relação da precedência entre as operações		
Nome da Aba:	OperacoesPrecede	
Coluna	Significado	Tipo
idOperacao	Código da operação	Inteiro
idOperacaoPrecedente	Código da operação precedente	Inteiro

APÊNDICE C – Planilha de resultados

Distribuição das Tarefas		
Contém os dados referentes a distribuição executada pelo algoritmo		
Nome da Aba:	distribuicao	
Coluna	Significado	Tipo
Linha	Linha de produção em que a tarefa do lote foi alocada	Char(30)
Recurso	Em qual recurso que a tarefa do lote foi alocada dentro da linha	Char(30)
Operador	Código do operador que a tarefa foi alocada	Inteiro
IdOperacao	Código da operação	Inteiro
Job	Número do Lote	Inteiro
Tarefa	Número da tarefa	Inteiro
Inicio	Momento de Inicio	Decimal
Fim	Momento de Fim	Decimal
Ordem	Número da Ordem de Produção (Lote)	Inteiro
Cor	Não preencher	-
Interno	Não preencher	-
Tempo	Tempo da tarefa	Decimal
Qtde	Quantidade de peças do lote	Inteiro
QtdeRecurso	Quantidade de recursos da linha	Inteiro

Distribuição das Tarefas		
Contém os dados referentes a distribuição executada pelo algoritmo		
Nome da Aba:	distribuicao	
Coluna	Significado	Tipo
Nome	Nome da linha de produção	Char(30)
Operadores	Numero de operadores da linha	Integer
Interna	"1" para linhas internas e "0" para linhas terceirizadas	Integer
IdLinha	Código da linha de produção	Integer
Recurso	Nome do recurso	Char(30)
Quantidade	Quantidade de Recursos Presentes na linha	Integer

Recursos		
Contém uma relação de todos os recursos disponíveis		
Nome da Aba:	Recursos	
Coluna	Significado	Tipo
idTipoRecurso	Codigo único do recurso	Inteiro
tipoRecurso	Descrição do Recurso	Char(30)

População		
Descreve a última população de indivíduos retornada pelo AGMO		
Nome da Aba:	Populacao	
Coluna	Significado	Tipo
TempoTotal	Tempo total necessário para terminar todas as tarefas	Decimal
OcupacaoInterna	Tempo da Ocupação interna	Decimal
Dominancia	Grau de dominância do indivíduo	Integer
Crowding	Distância de Crowding	Decimal
Cromossomo	Relação de codigos de linha de produção para cada lote	String

Geral		
Descreve informações a respeito do resultado		
Nome da Aba:	geral	
Linha	Significado	Tipo
IndividuoVencedor	Posição do indivíduo vencedor dentro da população	Integer
TamanhodaPopulacao	Tamanho da população	Integer
Geracoes	Numero de gerações	Integer
Metodo Cruzamento	Método de cruzamento	Integer
Metodo Mutação	Método de mutação	Integer
TempoTotal	Tempo Total em Segundos	Decimal
TempoTrabalhadoInterno	Tempo total trabalhado interno em segundos	Decimal
OcupacaoOperadores	Porcentagem média de ocupação dos operadores	Decimal
Dominancia	Grau de dominancia do indivíduo vencedor	Integer
Crowding	Distância de Crowding	Decimal
OcupacaoFabrica	Não preencher	-
Inicio	Data e hora de inicio da otimização	Char(20)
Fim	Data e hora de término da otimização	Char(20)
QtdeRecriaPop	Numero de vezes que a população foi recriada	Integer

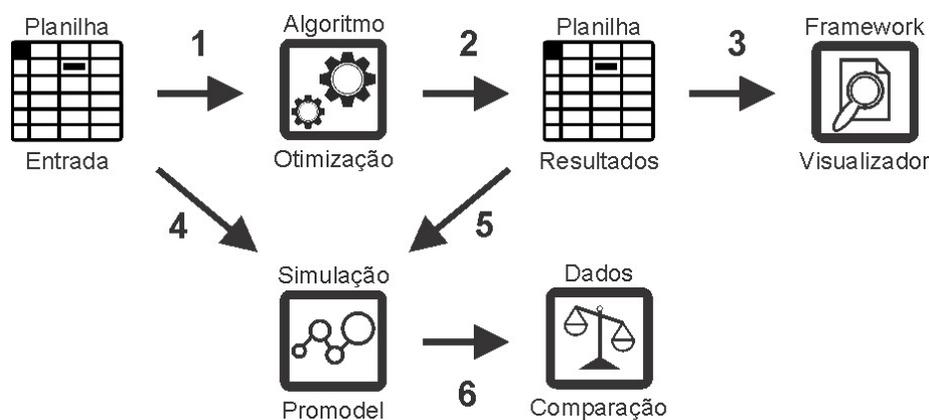
Evolução do Algoritmo		
Descreve o resultado obtido a cada geração		
Nome da Aba:	evolucao	
Linha	Significado	Tipo
Geracao	Numero da Geracao	Integer
TempoTotal	Tempo total necessário para terminar todas as tarefas	Decimal
OcupacaoOperadores	Eficiência da ocupação dos operadores	Decimal
TempoTrabalhadoInterno	Tempo total trabalhando internamento em segundos	Decimal
Dominancia	Grau de dominância	Integer
Crowding	Distância de Crowding	Decimal

Ocupação dos Operadores das Linhas		
Distribuição das tarefas por operador de cada linha		
Nome da Aba:	operadoreslinhas	
Coluna	Significado	Tipo
Linha	Nome da linha	Char(30)
Operador	Código do operador da linha	Integer
Recurso	Recurso alocado ao operador	Char(30)
POperador	Porcentagem de ocupação do operador	Decimal
PRecurso	Porcentagem de ocupação do recurso para o operador	Decimal
LinhaOperador	Nome da linha e Numero do operador	Char(40)

APÊNDICE D – Arquivos, Algoritmo e Framework

Para permitir que estudos sejam realizados e comparados com a sistemática, a apresentação e processamento dos resultados foram divididos em 6 etapas descritas na Figura 29. Na etapa 1 uma planilha descrevendo a estrutura das linhas, recursos, operadores e lotes de produção, conforme definido no APÊNDICE B, é submetida como entrada do algoritmo, esta planilha de entrada pode ser criada por qualquer empresa ou estudante que queira testar o algoritmo com seus dados.

Figura 29 – Estrutura de análise dos resultados



Na etapa 2 o algoritmo sugere um planejamento de produção em uma planilha de saída com formato definido no APÊNDICE C. Essa divisão permite que algoritmos similares sejam desenvolvidos, testados e comparados com a proposta da sistemática. Na etapa 3 o Framework recebe como entrada a planilha de saída do algoritmo e apresenta os resultados de forma gráfica e em relatórios que permitem a aplicação do resultado no chão de fábrica.

Nas etapas 4 e 5 a planilha de entrada e a planilha de resultados são submetidas ao modelo de simulação que imita o processo de fabricação e que na etapa 6 fornece os dados necessários para comparar a entrada com o resultado.

Espera-se que essa estrutura permita que trabalhos utilizem os dados e os códigos produzidos para desenvolver ainda mais seus projetos de pesquisa. Todos os códigos, base de dados, modelo de simulação e o framework estão disponíveis no endereço “<https://igorcarlospulini.github.io/>”.

APÊNDICE E – Resultados

	JAN-1	JAN-2	FEV-1	FEV-2	MAR-1	MAR-2	ABR-1	ABR-2	MAI-1	MAI-2	JUN-1	JUN-2
Capacidade Externa (Min)	2.127.840	2.127.840	1.915.056	2.340.624	2.340.624	2.340.624	2.340.624	1.702.272	2.127.840	2.127.840	2.127.840	2.340.624
Capacidade Interna (Min)	132.000	132.000	118.800	145.200	145.200	145.200	145.200	105.600	132.000	132.000	132.000	145.200
Sistemática Proposta												
Ocupação Interna (%)	97,70	98,47	96,96	97,21	96,88	97,80	97,43	95,47	97,45	96,64	94,84	95,45
Distância Meta (Min)	0,00	205,08	77,22	139,31	213,80	0,00	14,28	5,90	89,26	237,10	0,00	310,65
Desvio (Min)	69,97	394,26	0,00	254,55	395,82	30,76	79,80	31,75	155,59	466,47	87,93	163,65
Tempo Interno (Min)	128.428	135.032	115.008	144.538	145.850	141.790	141.822	100.959	130.814	133.299	124.705	142.498
Tempo Externo (Min)	137.006	134.939	72.126	218.641	141.517	102.675	44.568	749	76.156	90.859	0,00	48.783
MakeSpan (Min)	5.258,22	5.485,09	4.744,51	5.947,31	6.021,81	5.799,18	5.822,30	4.229,92	5.369,28	5.517,11	5.259,35	5.971,66
MakeSpan Interno (Min)	5.258,22	5.485,09	4.744,51	5.947,31	6.021,81	5.799,18	5.822,30	4.229,92	5.369,28	5.517,11	5.259,35	5.971,66
MakeSpan Terc. (Min)	5.001,34	3.242,84	1.669,54	4.861,46	5.132,77	1.749,69	2.330,63	121,82	2.336,59	3.942,92	0,00	1.039,49
Sistemática Atual												
Ocupação Interna (%)	47,95	24,92	61,18	56,44	51,52	27,38	26,99	60,56	86,78	62,05	62,86	84,62
Distância Meta (Min)	3.962,63	13.869,76	1.399,85	4.406,94	4.904,43	2.823,49	3.890,00	1.536,24	247,69	2.926,73	474,54	253,79
Tempo Interno (Min)	110.798,24	119.314,34	104.753,09	144.156,80	137.979,85	59.104,03	65.452,63	40.698,57	119.936,79	127.322,60	75.526,81	128.237,19
Tempo Externo (Min)	154.635,02	150.656,26	82.381,76	219.022,66	149.387,33	185.360,91	120.937,03	61.009,65	87.033,51	96.834,89	49.178,27	63.044,20
MakeSpan (Min)	9.242,63	19.149,76	6.151,85	10.214,94	10.712,43	8.631,49	9.698,00	2.687,76	5.527,69	8.206,73	4.805,46	6.061,79
MakeSpan Interno (Min)	5.067,68	5.322,54	4.529,10	6.581,71	6.316,34	2.705,57	3.384,83	1.894,62	5.527,69	6.053,25	4.805,46	6.061,79
MakeSpan Terc. (Min)	9.242,63	19.149,76	6.151,85	10.214,94	10.712,43	8.631,49	9.698,00	2.687,76	4.377,28	8.206,73	2.680,31	5.554,41