**TESE DE DOUTORADO**

SEQUENCIAMENTO E BALANCEAMENTO DE TAREFAS EM LINHAS SERIAIS MULTIMODELOS COM TEMPOS ESTOCÁSTICOS

Igor Carlos Pulini

Orientador: Michel José Anzanello

Colatina, Janeiro 2015

Laboratório de Otimização de produtos e processos – LOPP

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

**SUMÁRIO**

[1 Introdução 1](#_Toc444134028)

[1.1 Considerações Iniciais 1](#_Toc444134029)

[1.2 Tema e Objetivos 2](#_Toc444134030)

[1.2.1 Tema 2](#_Toc444134031)

[1.2.2 Objetivos 2](#_Toc444134032)

[1.3 Justificativa do tema 4](#_Toc444134033)

[1.3.1 Científica 4](#_Toc444134034)

[1.3.2 Social 5](#_Toc444134035)

[1.3.3 Pessoal 5](#_Toc444134036)

[1.4 Metodologia do trabalho 5](#_Toc444134037)

[1.5 Estrutura do trabalho 5](#_Toc444134038)

[1.6 Delimitações do trabalho 6](#_Toc444134039)

[2 Revisão bibliográfica 7](#_Toc444134040)

[2.1 O setor de Confecção 7](#_Toc444134041)

[2.2 Arranjo fisico 7](#_Toc444134042)

[2.3 Linha de Montagem 9](#_Toc444134043)

[2.4 Balanceamento de linha de montagem 21](#_Toc444134044)

[2.4.1 Objetivo 23](#_Toc444134045)

[3 Bibliografia 23](#_Toc444134046)

# Introdução

## Considerações Iniciais

O setor de confecções brasileiro representa 5,7% do valor total da produção da indústria de transformação e conta com um universo de mais de 100 mil empresas que empregam diretamente mais de 1,6 milhão de brasileiros o equivalente a 16,9% do total de trabalhadores alocados na produção industrial, no qual 75% dos postos de trabalho são mulheres. Nos últimos anos o setor vem sofrendo com a falta de planejamento do governo para tornar o pais mais competitivo o que se reflete no aumento das importações de produtos do vestuário que cresceu cerca de 25 vezes nos últimos 10 anos, e como consequência resultou em várias demissões como pode ser analisado no Gráfico 1. Em 2015 a produção física de produtos do vestuário teve uma queda de 10% em relação a 2014 com uma perda de cerca de 100 mil postos de trabalho (ABIT, 2016).

Gráfico - Empregos diretos (em milhares) (ABIT, 2016)

No setor de confecções a maioria das linhas de produção tem características semelhantes com um conjunto de estações de trabalho sequenciais ligadas de forma semiautomática ou totalmente manual. Desta forma a equalização da carga de trabalho de cada operador na linha de montagem é um trabalho desafiador para os gerentes industriais (Nassirnia & Md. Tap, 2010).

O mapa da produção mundial do vestuário começou a mudar na década de 80, saindo dos EUA, Europa e Japão para países emergentes da Ásia e, mais recentemente, leste Europeu, norte da África e Caribe. Atualmente, a Ásia é responsável por 73% do volume total produzido no mundo, com destaque, por ordem, para: China, Índia, Paquistão, Coreia do Sul, Taiwan, Indonésia, Malásia, Tailândia e Bangladesh (ABIT, 2016). A concorrência de produtos industrializados em países asiáticos vem afetando diretamente a indústria brasileira, em especial a China que representa 49,7 % da produção mundial, onde o governo chinês subsidia parte da produção industrial de forma a garantir empregos em seu país, possibilitando um baixo custo de produção para sua indústria e, por consequência, destaque no mercado internacional.

Para o setor de confecções esta concorrência influencia diretamente na sua organização industrial, pois produtos com características de produção em massa deixam de ser o foco e as indústrias passam a investir em produtos cada vez mais personalizados, esta estratégia exige uma completa reestruturação dos processos produtivos, desde a pesquisa e desenvolvimento da coleção até a produção e expedição do produto acabado. Espera-se assim fornecer ao mercado diversidade de produtos com elevado grau de qualidade, baixo custo e ciclos de vida menores, ampliando a atratividade dos produtos nacionais frente à concorrência internacional. Estas características de produção conhecidas como customização em massa, segundo (Silveira G.;Borenstein D.;Fogliatto F. S., 2000), refere-se à capacidade de fornecer produtos e serviços customizados através de processos flexíveis a custos baixos, e vem surgindo como alternativa para diferenciar empresas neste mercado altamente competitivo e segmentado.

(Uddin M. K.;Soto M. C.;Lastra J. L. M., 2010), destaca que no mercado globalizado onde a demanda é impulsionada pelos clientes, o maior desafio dos fabricantes é determinar um melhor balanceamento e sequenciamento das tarefas com o objetivo de atender a grande variedade de produtos com baixo volume de produção em uma mesma linha de montagem.

Diante destes desafios, impostos pelo sistema econômico vigente, intensificam-se nas empresas, bem como na academia, buscas por melhorias, que possibilitem à criação de diferenciais competitivos de mercado à indústria do vestuário. As atuais características de mercado exigem que as empresas trabalhem com lotes de produção cada vez menores, dificultando a formulação de layouts especializados de melhor desempenho e exigindo a formulação layouts de produção flexíveis para uma rápida e constante adaptação às exigências do mercado da moda, forçando as industrias a trabalharem com o conceito de just-in-time no qual as ordens de produção são criadas por demanda de acordo com a venda do produto e a posterior compra de matéria prima. Neste tipo de produção com uso intensivo de tarefas manuais, e consequente variação estocástica do tempo, existe uma grande dificuldade de fazer uso eficiente dos recursos de produção, assegurando uma rápida execução das tarefas e o cumprimento dos prazos de entrega.

A contribuição desta tese está na definição de um modelo real de balanceamento e sequenciamento das tarefas aplicado especificamente ao setor de confecções em linhas de produções seriais, multimodelos com tempos estocásticos. O trabalho inova ao propor um algoritmo genético multiobjectivo que trabalha com tempos estocásticos para resolução do problema.

## Tema e Objetivos

### Tema

O tema desta tese é o sequenciamento e balanceamento de tarefas em linhas seriais multimodelos com tempos estocásticos.

### Objetivos

Melhorar o balanceamento e o sequenciamento das tarefas em linhas seriais multimodelos com tempos estocásticos.

São objetivos específicos:

1. Identificar e selecionar as melhores práticas de sequenciamento e balanceamento utilizadas no processo industrial e tecnológico na indústria de vestuário;
   1. Aplicação de entrevistas e questionários junto a empresários, gerentes de produção, engenheiros de produção e operadores das indústrias de vestuário para identificação das técnicas de sequenciamento e balanceamento atualmente utilizadas, mesmo que de forma empírica;
   2. Levantamento e análise de dados produtivos das indústrias relacionados ao sequenciamento e balanceamento das ordens de produção;
   3. Cruzamento dos dados de produção com as técnicas utilizadas no sequenciamento e balanceamento para determinar aquelas que conduzem ao melhor desempenho produtivo.
2. Propor um modelo multiobjectivo para sequenciamento e balanceamento apoiado nas melhores práticas da indústria de vestuário;
3. Revisão literária das técnicas de sequenciamento e balanceamento de produção;
4. Revisão literária sobre métodos heurísticos e exatos de otimização de sequenciamento e balanceamento de produção;
5. Executar a modelagem computacional de forma a adequar às 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 em um software;
6. Comparar e analisar o desempenho produtivo obtido com a utilização do Modelo;
7. Comparar dados produtivos obtidos antes e depois da implantação do software

## Justificativa do tema

### Científica

Mesmo considerando a grande variedade de artigos científicos envolvendo o tema de balanceamento de linhas de produção, ainda há uma grande lacuna entre a academia e as aplicações práticas até agora. Uma das razoes para este défice está no fato de que os trabalhos de pesquisa consideram apenas um único ou apenas algumas extensões de balanceamento, na prática existe a necessidade de se trabalhar com inúmeras extensões combinadas (Boysen, et al., 2008).

Apesar dos grandes avanços na automação de processos, ainda há muitos sistemas de montagem que dependem principalmente ou completamente de trabalho manual (Zhuming & Zhang, 2001) (Tempelmeier, 2003).

A importância do setor de vestuário no estado do ES é caracterizada pelas 1.237 empresas que geram em torno de 17.042 empregos diretos (MTE/RAIS, 2009), com uma receita anual em torno de R$ 500 milhões (IBGE/PIA, 2014). Segundo (IDEIES, 2011), a abertura da economia internacional intensificou a concorrência mundial, apresentando novas formas de organização sócio espaciais, como o deslocamento de atividades produtivas mais intensivas de trabalho para os países de menor custo de mão de obra. A Ásia se destaca como principal concorrente para o setor têxtil e de vestuário.

Neste cenário competitivo, as empresas do setor têxtil e de vestuário capixaba encontram na inovação tecnológica seu principal desafio para manterem-se competitivas, tendo que priorizar investimentos em setores críticos como: Desenvolvimento de produtos e design; Aperfeiçoamento da manufatura; Flexibilidade e desenvolvimento da marca; Comercialização e distribuição.

Esta concorrência força as empresas de confecções a se tornarem mais competitivas, buscando meios que proporcionem um maior desempenho de suas linhas de produção.

### Social

Grande número de empregos que estão sendo perdidos nas indústrias de confecções do estado do espírito santo devido à concorrência com as empresas de vestuário asiáticas.

### Pessoal

Experiência com indústria de confecções desde 1996; Sócio proprietário da Matriz Sistemas (até 2009), empresa desenvolvedora de software ERP para o setor de confecções, no qual fui responsável pelo desenvolvimento de módulos voltados para o planejamento e controle de produção, explosão de materiais, expedição, compras e formação de preço de produtos; Mestrado em inteligência computacional voltado para o otimização de produção em ambientes dinâmicos com algoritmos genéticos multiobjetivo e análise multicritério; Desenvolvimento e implantação de software de balanceamento de layout produtivo para Mona Indústria do vestuário (Vila Velha); Desenvolvimento e implantação de software de pagamento de produtividade e controle de produção para P W Brasil Export SA (Colatina); Desenvolvimento de aplicativo utilizando lógica Fuzzy para classificação de produtos de vestuário para a P W Brasil Export SA; Abertura junto aos empresários do setor de vestuário; Professor efetivo IFES-Campus Colatina.

## Metodologia do trabalho

A estratégia metodológica nesta investigação é a pesquisa de **pesquisa-Ação**. A natureza desta pesquisa é **aplicada**. A abordagem é **mista** com enfoque quantitativo. O método de pesquisa é **dedutivo**, utilizando-se da **hipótese**: Se validarmos o modelo de sequenciamento e balanceamento de tarefas com tempos estocásticos junto às empresas de vestuário as empresas terão um melhor desempenho produtivo. Segundo (POPPER, 1953), a hipótese deve ser testada para ver se ela é verdadeira.

## Estrutura do trabalho

Além deste capítulo introdutório a tese está estruturada em mais cinco capítulos que abordam assuntos relacionados ao objetivo da pesquisa.

Capítulo dois é uma revisão literária dos assuntos relacionados à pesquisa: Sequenciamento e balanceamento de produção; Arranjo físico; Algoritmos genéticos multiobjectivos e Análise multicritério.

Capítulo três aborda os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento da tese, técnicas de coleta e tratamento de dados.

Capítulo quatro apresenta a formulação do problema, modelagem matemática.

Capítulo cinco apresenta solução proposta.

Capítulo seis analisa os resultados obtidos com a aplicação da proposta, comparando o resultado com as técnicas atualmente utilizadas, simulação e com a literatura.

## Delimitações do trabalho

O modelo proposto foi projetado com características específicas da industrias do vestuário, para layouts de produção que utilizam linhas de produção em série, multimodelo, com emprego de tarefas manuais (tempos estocásticos) com equipamentos fixos.

# revisão bibliográfica

## Métodos de Otimização com múltiplos objetivos

Otimizar significa tornar ótimo ou ideal, é extrair o melhor rendimento possível de qualquer área de atividade empregando técnicas para selecionar as melhores alternativas para se atingir os objetivos. Otimização refere-se a encontrar um ou mais soluções viáveis que corresponda a valores extremos de um ou mais objetivos. Na Prática problemas de otimização no mundo real, naturalmente envolvem múltiplos objetivos e na maioria das vezes conflitantes (Srinivas & Deb, 1994) (Zitzler & Thiele, 1999). Ou seja, quando se considera objetivos simultaneamente que concorrem entre si, a melhora de um degrada os demais.

Alguns conceitos e definições amplamente utilizados na literatura (Zitzler & Thiele, 1999) (Coello, et al., 2007) (Deb, 2009) são descritos a seguir.

Maximiza / Minimizar

*(a) m= 1, 2, 3, ..., M*

*Sujeito a:*

*(b) j= 1, 2, 3, ..., J*

*(c) k= 1, 2, 3, ..., K*

*(d) i= 1, 2, 3, ..., N*

1. Existem *M* funções objetivos 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 chamadas, variáveis de decisão: = (), tem seus valores alterados.
2. e (c) São restrições de comportamento representadas por funções de igualdade ou desigualdade que delimitam situações inadequadas a solução do problema.
3. São as restrições laterais que delimitam diretamente as variáveis de decisão.

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 se encontra no **ponto ótimo**, que é um vetor 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 o objetivo conforme pode ser visualizado na Figura 1. Desta maneira na possível ter diversos pontos mapeados no espaço de decisão apontando para diferentes pontos no espaço objetivo.



Figura - Espaço de decisão x espaço objetivo adaptado (Deb, 2009)

Erroneamente pode-se pensar que a otimização com múltiplos objetivos a tarefa se seja buscar uma ótima solução para cada função objetivo, porém, como mais de uma função objetivo deve ser avaliada simultaneamente a otimização não pode ser aplicada a somente um objetivo enquanto os outros objetivos também são importantes. Segundo (Deb, 2009) existe 2 abordagens para solucionar problemas de otimização com múltiplos objetivos descritas na Figura 2:

1. Buscar múltiplas soluções com diferentes valores para os objetivos e com este conjunto de ótimas soluções utilizar informações adicionais para escolher uma dentre as soluções.
2. Utilizar um peso para cada objetivo durante o processo de busca transformando o processo de busca com múltiplos objetivos em um processo de busca com um simples objetivo.



Figura - Solução com múltiplos objetivos (Deb, 2009)

A abordagem “a” é mais metódica, prática e menos subjetiva, porém se há um conhecimento confiável o bastante para estabelecer os pesos a segunda abordagem pode ser mais adequada. Utilizar pesos para combinar vários objetivos em uma única função objetivo durante o processo de otimização, tem a vantagem de produzir uma única solução, porém definir os pesos para cada objetivo requer um conhecimento profundo, muitas vezes, não disponível (Zitzler & Thiele, 1999).

É ilusório conceder uma solução ótima para um problema que trate simultaneamente objetivos conflitantes 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, onde todos os objetivos são simultaneamente considerados. Métodos de otimização com múltiplos são geralmente muito sensíveis a pequenas alterações nos coeficientes da função de penalidade ou nos pesos da função objetivo (Horn, et al., 1994).

Alguns pesquisadores como (Fonseca & Fleming, 1995), sugerem que o uso de algoritmos evolucionários para otimização com múltiplos objetivos é mais adequado do que outras buscas cegas.

fizeram uma comparação entre os algoritmos evolucionários multiobjectivos e o que obteve o melhor resultado nos testes foi algoritmo de classificação genética não dominada (NSGA) (Zitzler & Thiele, 1999) (Srinivas & Deb, 1994) (Dias & Vasconcelos, 2002)

Algoritmos evolucionários

Alguns autores

## Sequenciamento

Falar sobre o sequenciamento pinedo

## Balanceamento de Produção

## Arranjo fisico

O arranjo físico é uma das principais decisões que determinam a eficiência a longo prazo das operações, podendo ajudar a organização a obter uma vantagem estratégica que proporcione diferenciação, baixo custo ou resposta rápida (Heizer & Render, 2001). Segundo (Slack, et al., 2009) o arranjo físico é como seus recursos transformadores são posicionados um em relação ao outro e como as várias tarefas estão alocadas a estes recursos transformadores. A maioria dos arranjos físicos derivam apenas de quatro tipos básicos de arranjos físicos:

1. **Posicional** no qual quem sofre a transformação fica estacionário enquanto os equipamentos, maquinários, instalações e pessoas se movem a medida do necessário.
2. **Funcional** no qual os recursos ou processos similares são localizados juntos uns dos outros, desta forma, diferentes produtos terão diferentes necessidades, portanto percorrerão diferentes roteiros, fazendo com que o padrão de fluxo seja bastante complexo.
3. **Por produto** no qual os recursos transformadores são arranjados fisicamente na mesma sequência das atividades requeridas pelo produto.
4. **Celular** que mescla características do arranjo funcional e por produto no qual os recursos transformadores necessários para atender as necessidades se encontram agrupados.

Segundo (Simaria, 2001), é possível associar o perfil da procura dos produtos acabados aos tipos de arranjos físicos conforma pode ser visualizado na Figura 1, nos quais o ponto A e B correspondem a situações extremas em relação a variabilidade dos produtos e a quantidade de produtos fabricados. O ponto A produz grande número de produtos diferentes em lotes de uma unidade, já ponto B um único produto é fabricado em grandes quantidades para satisfazer a grande procura.

Em ambos os casos surge a necessidade de distribuir de forma uniforme as tarefas com a finalidade de obter altas taxas de utilização e fluxo contínuo de produção. Este problema é usualmente conhecido como balanceamento de linhas de produção.



Figura - Perfil de procura x sistema de produção (Simaria, 2001)

Conforme (Heizer & Render, 2001), os problemas das linhas de produção e das linhas de montagem são semelhantes, dessa forma é possível concentrar os esforços na resolução de problemas de linha de montagem.

## Linhas de montagem

O processo de construção de um produto é dividido em operações elementares chamadas de tarefas V = {1,...n}, e o tempo de execução de uma tarefa *j* é dado pelo tempo *tj,* onde cada tarefa necessita de um equipamento e capacitação do operador para ser executada. Uma linha de montagem pode ser definida como um conjunto de estações de trabalho composta por um ou vários operadores, dispostas de forma sequencial e ligados através de um sistema de transporte de material, no qual cada estação é responsável por um conjunto de tarefas pré-definidas no processo de montagem dos produtos. Originalmente linhas de montagem foram desenvolvidas e aplicadas na produção em massa de produtos padronizados explorando a especialização de trabalho e os efeitos da aprendizagem, porém atualmente vem ganhando importância na produção em baixos volumes (Boysen, et al., 2006).

Devido as condições tecnológicas e organizacionais é necessário respeitar as restrições de precedência das operações que podem ser representadas por meio de um grafo direcionado composto por nós numerados que representam as tarefas e por arcos que definem o tempo e definem as relações de precedência entre as tarefas. As relações de precedência podem ser resumidas e presentadas por um grafo direcionado conforme Figura 1 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 - Grafo de precedência (Scholl & Becker, 2006)

(Becker C.;Scholl A., 2006), classificou as linhas de produção quanto ao número de produtos conforme Figura 1, onde cada figura geométrica representa um diferente modelo produzido:

1. Linha de produção simples: Produção em massa de um único produto.
2. Linha de produção mista: Utilizada na produção de vários modelos de um produto, geralmente com tempo de setup insignificante.
3. Linha multi-modelo: Utilizada quando existem diferenças significativas entre cada modelo de produto, geralmente utilizado em lotes.



Figura - Linhas de montagem (Becker C.;Scholl A., 2006)

Uma característica importante da linha de montagem diz respeito a variabilidade do tempo da tarefa. Tarefas com pouca variação no tempo, geralmente tarefas simples ou estações automatizadas os tempos são considerados deterministas, já variações consideráveis principalmente devido à instabilidade de trabalhos manuais relacionados a habilidade e motivação dos funcionários exigem que o tempo seja considerado estocástico (Becker C.;Scholl A., 2006).

Segundo ( Ponnambalam, et al., 2000) ao projetar uma linha de montagem algumas restrições devem ser impostas ao agrupamento de elementos de trabalho tais como:

1. Gráfico de precedência das operações
2. O número de estações de trabalho deve ser menor que o número de estações de trabalho disponíveis.
3. O tempo de ciclo deve ser maior ou igual ao máximo tempo de qualquer estação de trabalho.

(Boysen, et al., 2006) Propôs a classificação das linhas de montagem com base em 3 elementos representados pela notação [α│β│γ], onde:

* α – Representa as características do grafo de precedência que é representado por 6 atributos α1 a α6;
* β – Representa as características da estação e da linha de produção que é representado por 6 atributos β1 a β6;
* γ – Representa os objetivos, no qual γ ϵ {*m*, *c*, *E*, *Co*, *Pr, SSLk, score,* o}.

Para cada um dos elementos descreve uma série de possibilidades e restrições que são encontrados em problemas reais e que são retratados pela literatura. As características do grafo de precedência são descritas na Tabela 2.

|  |  |
| --- | --- |
| **Características do grafo de precedência** | |
| **Grafo de precedência do produto: α1 ϵ {mix, mult, o}** | |
| α1 = mix | Modelo de produção misto |
| α1 = mult | Modelo de produção multi-modelo |
| α1 = o | Modelo de produção de um único modelo |
| **Estrutura do grafo de precedência: α2 ϵ {spec, o}** | |
| α2 = spec | Precedência de acordo com grafo |
| α2 = o | A precedência pode ter qualquer estrutura acíclica |
| **Tempo de processamento: α3 ϵ {tsto, tby, o}** | |
| α3 = tsto | Tempo de processamento estocástico |
| α3 = tby | Tempo de processamento dinâmico (aprendizagem) |
| α3 = o | Tempo estático e determinístico |
| **Incremento no tempo dependendo da sequência α4 ϵ {Δtdir, Δtind, o}** | |
| α4 = Δtdir | Se 2 tarefas são executadas na mesma estação um tempo adicional pode ser necessário para o setup ou alteração das ferramentas |
| α4 = Δtind | O tempo é incrementado se o estado de conclusão de uma tarefa tem efeito sobre o tempo de processamento de outras tarefas que são executadas mais tarde na mesma ou em outra estação |
| α4 = o | Não considera incremento de tempo de acordo com a sequência |
| **Restrições de atribuição α5 ϵ {link, inc, cum, fix, excl, type, min, max, o}** | |
| α5 = link | Subconjunto de tarefas são ligadas de tal forma que devem ser atribuídos a mesma estação |
| α5 = inc | Subconjunto de tarefas são incompatíveis e não devem ser atribuídos a mesma estação |
| α5 = cum | A atribuição da tarefa está sujeita a restrições sobre o valor acumulado de determinado atributo (Ex. espaço restrito de material) |
| α5 = fix | Algumas tarefas só podem ser atribuídas a estações particulares |
| α5 = excl | Algumas tarefas não podem ser atribuídas a estações particulares |
| α5 = type | Algumas tarefas devem ser atribuídas a uma estação a partir de um determinado conjunto |
| α5 = min | Ao atribuir uma tarefa distâncias mínimas em relação a outras tarefas medida em tempo, espaço ou sequência tem que ser observadas |
| α5 = max | Ao atribuir uma tarefa distâncias máximas em relação a outras tarefas devem ser observadas |
| α5 = o | Não há restrições de atribuição |
| **Alternativas de processamento α6 ϵ {, o}** | |
| α6 = | Alternativas de processamento podem ser separados seguindo alternativas do grafo de precedência definido por ϵ {o, prec, subgraph} |
| = o | Alternativas de processamento só se desviam em relação a tempo e custo |
| = prec | Alternativas de processamento não só afeta o tempo e o custo, mas também a relação de precedência entre as tarefas |
| = subgraph | Alternativas de processamento podem alterar o processo de produção de modo que subgrafos podem ser substituídos. Ex. Quando um conjunto de ações podem ser instalados separadamente ou completamente substituído por uma parte comprada |
| α6 = o | Não são consideradas alternativas de processamento |

Tabela - Características do grafo de precedência (Boysen, et al., 2006)

As características da estação de trabalho e da linha de produção são descritas na Tabela 3.

|  |  |
| --- | --- |
| **Características da estação de trabalho e da linha de produção** | |
| **Movimentação dos produtos: β1 ϵ {o, }** | |
| β1 = o | Em linhas de produção ritmadas o tempo de ciclo restringe o tempo de cada estação de trabalho com ϵ {o, each, prob} e ϵ {o, div} |
| = o | A cada ciclo o trabalho em uma estação é limitado pela média do tempo de ciclo. Esta restrição é rigorosa na produção de um modelo único, é cumprida em média no caso da produção de modelo misto, algum modelo de paralelização ou tempos estocásticos. |
| = each | A cada modelo o tempo de ciclo deve ser respeitado seja para modelo misto ou multi-modelo |
| = prob | A restrição de tempo de ciclo é obedecida seguindo determinada probabilidade ou proporção |
| = o | Todas as estações e modelos devem considerar o mesmo tempo de ciclo global |
| = div | O tempo de ciclo diverge entre as estações de trabalho e modelos dos produtos |
| β1 = | Linhas unpaced não são restringidas por um tempo de ciclo. Em vez disso ela avança quando as estações tiverem completado suas tarefas, com ϵ {o, cync} |
| = o | Em linhas assíncronas, logo que uma estação de trabalho termina uma tarefa, a peça é movida para a estação seguinte, ou para um buffer a frente, a menos que ocorra um bloqueio. Neste caso o problema de ALB é acompanhado de uma decisão adicional de posicionamento e dimensionamento de buffers. |
| = sync | Em linhas de trabalho síncronas o movimento dos produtos é coordenado entre as estações de trabalho, ou seja, um produto é movido para a estação seguinte quando todas as estações tiverem completado a tarefa |
| **Layout da linha: β2 ϵ {o, }** | |
| β2 = o | As estações são dispostas em série ao longo do fluxo da linha de produção |
| β2 = | Utilizada linha de produção em formato de U com estações se cruzando, onde ϵ {o, n} |
| = o | Linha em formato simples de U |
| = n | A linha e composta por *n* seguimentos em formado de U |
| **Paralelização: β3 ϵ {, }** | |
| β3 = | Mais de uma linha paralela deve ser balanceada ou o número de linhas instaladas faz parte do problema de decisão |
| β3 = | Quando as estações estão em paralelo, os seus recursos e conteúdos de trabalho são duplicados para permitir o processamento de todas as tarefas alternadamente |
| β3 = | Uma tarefa paralelizada é relacionada a mais de uma estação. Dessa forma um trabalho adicional é inserido ao processar uma tarefa paralela alternadamente |
| β3 = | Várias estações trabalham simultaneamente na mesma parte em locais diferentes de montagem de modo que um não obstrua o trabalho do outro. O problema de equilíbrio está ligado a programação detalhada de forma a evitar que operadores diferentes interferir uns com os outros. |
| β3 = o | Nenhum tipo de paralelização é considerado |
| = o | Seja um nível fixo ou máximo de paralelização que constitui o problema o número de linhas em paralelo é dado por = {1, 2, 3...} |
| Atribuição de recursos: β4 = {*equip*, , o} | |
| β3 = *equip* | Para cada estação exatamente um equipamento deve ser escolhido entre um conjunto de alternativas especificados. O problema de equilíbrio está ligado a um problema de seleção de equipamento. |
| β3 = | Em vez de selecionar um único equipamento a partir de um conjunto de alternativas de equipamentos, o equipamento de uma estação está configurado juntamente com a atribuição da tarefa. Se várias tarefas requerem o mesmo recurso, sinergias podem combinar estas tarefas na mesma estação de trabalho, pois os recursos são necessários apenas uma vez reduzindo os custos. Existem 2 tipos básicos de sinergia dados por = {o, 01, *max*} |
| = o | Os recursos são modelados explicitamente para a conta ou outro tipo de sinergia ou dependência |
| = 01 | Se mais de uma tarefa pode ser realizada com o mesmo recurso (ferramenta ou máquina), o custo de investimento é reduzido se as tarefas são atribuídas a mesma estação, pois o recurso tem que ser instalado apenas uma vez. Isto é uma decisão de investimento 0-1 tem de ser feita para cada combinação de estação e recurso |
| = *max* | Se as tarefas diferem em relação a qualidade dos recursos (velocidade, capacidade ou qualificação), é exigido a seleção dos recursos de forma a cumprir o nível de demanda máxima das tarefas. Por exemplo, se os operadores precisam de uma qualificação especifica para cumprir uma tarefa difícil |
| Incremento de tempo dependente da estação: β5 = { *Δtun*p, o} | |
| β5 = *Δtu*np | Quando alguma parte do tempo da estação é consumida por atividades improdutivas como transporte da peça ou o retorno dos trabalhadores para o início da estação no final do ciclo |
| β5 = *o* | Incremento de tempo dependente da estação não é considerado |
| Aspectos adicionais da configuração da linha: β6 = {*buffer, feeder, mat, change, o*} | |
| β6 = *buffer* | Locais de armazenagem intermediários são necessários e devem ser alocados e dimensionados |
| β6 = *feeder* | Um ou mais linhas de alimentação fluem de uma linha principal e exigem uma coordenação simultânea de atribuições de tarefa e tempo de ciclo |
| β6 = *mat* | Caixas contendo a necessidade de material deve ser posicionada e dimensionada |
| β6 = *change* | Se determinadas tarefas exigir que a peça de trabalho esteja em determinada posição (levantada, inclinada, etc.), uma decisão tem que ser feita, se a posição é fixa dentro da estação de trabalho ou se maquinas especiais são necessárias para a mudança de posição |
| β6 = *o* | Não são considerados aspectos adicionais na configuração da linha |

Tabela - Características da estação de trabalho e da linha de produção

O processo de balanceamento é guiado por um objetivo que se busca ao executar o processo de balanceamento da linha de produção. As características destes objetivos estão descritas na Tabela 4.

|  |  |
| --- | --- |
| **Objetivos** | |
| **Objetivos: ϵ {*m, c, E, Co, Pr, , score, o}*** | |
| = *m* | Minimizar o número de estações *m* sujeita a um determinado alvo de saída para um determinado horizonte de planejamento (especificado o tempo de ciclo ou a taxa de produção) |
| = *c* | Minimizar o tempo de ciclo para um dado número de estações |
| = *E* | Maximizar a eficiência E da linha respeitando as restrições de taxa de produção e número de estações |
| = *Co* | Minimizar os custos para uma dada meta de produção |
| = *Pr* | Resultado definido como a diferença entre receita e custo é maximizada |
| = | Os tempos das estações devem ser suavizados. Há 2 maneiras de suavizar os dados para = {*stat*, *line*} |
| = *stat* | Na produção de modelos misto onde os tempos da estação são variáveis por causa dos diferentes modelos |
| = *line* | Os tempos das estações são suavizados sobre todas as estações da linha |
| = *score* | O objetivo é minimizar ou maximizar alguma pontuação composta relacionada com um ou mais atributos que descrevem aspectos de gargalo ou outras medidas de eficiência |
| = *o* | A função objetivo não é necessária, somente soluções viáveis são procuradas |

Tabela – Objetivos

## Balanceamento de linha de montagem

O problema de balanceamento da linha surge quando se decide distribuir o trabalho entre as estações de forma que cada estação fique com uma mesma carga produtiva (Becker C.;Scholl A., 2006),

O balanceamento de uma linha de montagem é processo de distribuir de forma equilibrada o trabalho de montagem entre as estações guiado por um objetivo conhecido (ALBP- Assembly line balancing problem). Qualquer ALBP consiste em 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. Algumas definições dadas por (Kumar & Mahto, 2013) são necessárias para uma melhor compreensão dos cálculos de balanceamento de uma linha de montagem:

1. Tempo total necessário para a produção de um produto é igual ao somatório dos tempos de todas as operações conforme Equação 1, no qual *ti* é tempo necessário para completar a tarefa i da linha de produção e *k* é úmero total de operações a serem executadas na linha de produção.

Equação – Tempo total

* Tempo de ciclo 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

Equação - Tempo de Ciclo

* O cálculo do número mínimo de estações necessárias está descrito na Equação 3, na qual o resultado deve ser sempre arredondado para cima.

Equação - Numero de estações de trabalho

* Eficiência da linha de montagem.
* Folga na linha de montagem

A classificação do ALBP proposta por (Baybars, 1986) divide os problemas em 2 classes:

1. Problema de Balanceamento da Linha de Montagem Simples (SALBP, em inglês Simply Assembly Line Balancing Problem)
2. Problema de Balanceamento da Linha de Montagem Geral (GALBP, em inglês General Assembly Line Balancing Problem).

A SALBP é o problema mais estudado do campo de balanceamento de linha de montagem e segundo (Scholl & Becker, 2006) possui as seguintes propriedades:

* Produção em massa de um produto homogêneo;
* Todas as tarefas são processadas de um modo pré-determinado;
* Linha compassada com tempo de ciclo *c* fixo de acordo com uma desejada quantidade de resultado;
* Tempos de operação (de tarefa) determinísticos e inteiros;
* Nenhuma restrição de atribuição além das restrições de precedência;
* Layout da linha em série com *m* estações somente de um lado e sem linha de alimentação;
* A sequência do processamento das tarefas está sujeita a restrições de precedência;
* Uma tarefa não pode ser dividida entre duas ou mais estações;
* Todas as estações são igualmente equipadas com respeito a máquinas e trabalhadores;
* Maximização da eficiência da linha: , no qual *m* é o número de estações de trabalho, *c* é o tempo de ciclo e *tsum* = é a soma dos tempos de todas as tarefas.

Segundo (Scholl, 1999) os SALBP podem classificada em 4 tipos diferentes em relação a função objetivo conforme pode ser visualizado na Tabela 1:

1. SALBP-1: Dado um tempo de ciclo c, minimizar o tempo ocioso das estações.
2. SALBP-2: Dado o número de estações, minimizar o tempo de ciclo.
3. 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 uma melhor eficiência.
4. 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.



Tabela - Versões SALBP (Scholl & Becker, 2006)

É possível perceber que as características do SALBP são restritas o que não permite representar adequadamente problemas do mundo real. Para estes problemas do mundo real com um número maior de considerações é utilizado os chamados problemas de balanceamento de linha de montagem gerais (GALBP), que atualmente vem ganhando mais interesse por parte dos pesquisadores (Martino & Pastor, 2010).

Mesmo com várias descrições do ALBP na literatura há 5 características presentes em qualquer tipo de ALBP (Boysen, et al., 2006). São elas:

1. Os produtos são conhecidos
2. Um conjunto de processamentos alternativos é dado.
3. A linha deve ser configurada de modo que as quantidades alvo de produção sejam satisfeitas considerando certo horizonte de planejamento.
4. O fluxo da linha é unidirecional.
5. A sequência de processamento das tarefas está sujeita a restrições de precedência.

Com o intuito de facilitar o entendimento (Ghosh, 1989), propôs a classificação dos ALB conforme Figura 4, na qual os problemas são subdivididos em problemas de linha de modelo simples ou multi-modelo/misto e com relação a variabilidade dos tempos determinístico ou estocástico e no ultimo nível dividiu os problemas em SALBP e GALBP.



Figura Classificação ALBP (Ghosh, 1989)

Uma classificação similar foi proposta por (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014) conforme pode ser visualizado na Figura 5, no qual o autor substituiu o ultimo nível pelas características da linha de montagem entre em série e formato de U.



Figura - Classificação ALBP (Sivasankaran & Shahabudeen, 2014)

Segundo ( Ponnambalam, et al., 2000) problemas balanceamento são classificados em 2 tipos:

1. Tipo 1: Dado o tempo de ciclo e a precedência, o objetivo é minimizar o número de estações de trabalho. Este modelo surge quando há a concepção de novas linhas de montagem.
2. Tipo 2: Dado as estações de trabalho o objetivo é minimizar o tempo de ciclo. Neste modelo é necessário tratar a precedência das operações e o posicionamento dos postos de trabalho.

# Bibliografia

Ponnambalam, S. G. P., Aravindan, P. A. & Naidu, G. M. N., 2000. A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Tecnology,* 16(1), p. 341–352.

ABIT, 2016. *Relatório de Atividades ABIT 2015,* São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção.

Baybars, I. B., 1986. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science,* 32(1), pp. 909-932.

Becker C.;Scholl A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research,* p. 694–715.

Boysen, N. B., Fliedner , M. F. & Scholl, A. S., 2006. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 14 Dezembro, p. 674–693.

Boysen, N. B., Fliedner, M. F. & Scholl, A. S., 2008. Assembly line balancing: Which model to use when?. *Int. J. Production Economics*, 7 Março, p. 509–528.

Boysen, N. B., Fliedner, M. F. & Scholl, A. S., 2009. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research,* 192(1), p. 349–373.

Chen J. C.;Chen C. C.;Su L. H.;Wub H. B.;Sun C. J., 2012. Assembly line balancing in garment industry. *Expert Systems with Applications,* p. 10073–10081.

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

Graeml A. R.;Peinado J., 2007. *Administração da Produção (Operações Industriais e de Serviços).* Curitiba: UnicenP.

Heizer, J. H. & Render, B. R., 2001. *Administração de Operações.* 5 ed. s.l.:LTC.

IBGE/PIA, 2014. *Relatório de acompanhamento setorial: Têxtil e confecção.* [Online]   
Available at: http://www.abdi.com.br/Estudo/textil%20e%20confeccao%20junho%2008.pdf  
[Acesso em 10 6 2014].

IDEIES, 2011. *Textil e Confecções do Espírito Santo, Caderno Inteligência Competitiva.* Vitória-ES: IDEIES.

Kumar, N. K. & Mahto, D. M., 2013. Assembly Line Balancing: A Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application. *Global Journal of Researches in Engineering*, pp. 28-49.

MARCONI, M. D. A. & LAKATOS, E. M., 2010. *Fundamentos da Metodologia Científica 7ª. ed..* São Paulo: Atlas.

Martino, L. M. & Pastor, R. P., 2010. Heuristic procedures for solving the general assembly line balancing problem with setups. *International Journal of Production Research,* 48(1), pp. 1787-1804.

MTE/RAIS, 2009. *Ministério do trabalho e emprego.* [Online]   
Available at: http://www3.mte.gov.br/rais/  
[Acesso em 10 6 2014].

Nassirnia, P. N. & Md. Tap, M. M. T., 2010. Strategies to Achieve Labor Flexibility in the Garment Industry. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues,* 7(4).

POPPER, K., 1953. *Science: Conjectures and refutations. philosophyfaculty.ucsd.edu/.* [Online]   
Available at: http://philosophyfaculty.ucsd.edu/faculty/rarneson/Courses/popperphil1.pdf  
[Acesso em 24 Março 2014].

Scholl, A., 1999. *Balancing and sequencing assembly lines.* s.l.:Darmstadt Technical.

Scholl, A. S. & Becker, C. B., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 11 Setembro, p. 694–715.

Scholl, A. S. & Becker, C. B., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 11 Setember, p. 666–693.

Silveira G.;Borenstein D.;Fogliatto F. S., 2000. Mass customization: Literature review and research directions. *Production Economics,* pp. 1-13.

Simaria, A. S. d. A. S., 2001. *Uma Metodologia para o Balanceamento de Linhas de Montagem.* Porto: EGP.

Sivasankaran, P. S. & Shahabudeen, P. S., 2014. Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1665–1694.

Sivasankaran, P. S. & Shahabudeen, P. S., 2014. Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 73(9), pp. 1665-1694.

Slack, N. S., Chambers, S. C. & Johnston, R. J., 2009. *Administração da Produção.* 3 ed. São Paulo: Atlas S.A..

Tempelmeier, H. T., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of,* 41(1), p. 149–170.

Uddin M. K.;Soto M. C.;Lastra J. L. M., 2010. An integrated approach to mixed-model assembly line balancing and sequencing. *Assembly Automation,* pp. 164 - 172.

Zhuming , B. Z. & Zhang, W. Z., 2001. Flexible fixture design and automation: review, issues and future directions. *International Journal of Production Research,* 39(13), pp. 2867- 2894.