



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA**

**RAFHAEL SOUZA E SILVA**

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO DE  
PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA  
EMPRESA CALÇADISTA**

**FORTALEZA**

**2013**

**RAFHAEL SOUZA E SILVA**

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO DE  
PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA  
EMPRESA CALÇADISTA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto.

**FORTALEZA**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S583b Silva, Rafael Souza e.

Balanceamento de uma linha de montagem com o uso de programação não linear inteira : um estudo de caso em uma empresa calçadista / Rafael Souza e Silva. – 2013.  
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Fortaleza, 2013.  
Orientação: Prof. Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto.

1. Balanceamento da linha de montagem. 2. Programação não linear inteira. 3. Otimização. 4. Projeto de arranjo físico. I. Título.

CDD 658.5

---

**RAFHAEL SOUZA E SILVA**

**BALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE MONTAGEM COM O USO DE  
PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRA: UM ESTUDO DE CASO EM UMA  
EMPRESA CALÇADISTA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção Mecânica.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Anselmo Ramalho Pitombeira Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Sérgio José Barbosa Elias  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Heráclito Lopes Jaguaribe Pontes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo exemplo e pelo apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por toda inspiração, motivação e força.

Aos meus pais, José Wellington e Silva e Sanzia Souza e Silva, por todo o exemplo, dedicação, esforço e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao professor orientador, Anselmo Ramalho Pitombeira Neto, pelo apoio e pela orientação em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus amigos que me apoiaram e se alegraram com mais esta etapa em minha vida.

## RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade apresentar o estudo e pesquisa para a criação de um modelo matemático, tendo como base a programação não linear inteira, para o uso no problema de balanceamento em uma linha de montagem. O uso deste modelo define a solução ótima do problema, levando em consideração a limitação da esteira de montagem e um aproveitamento superior a 85% da mão de obra. O estudo de caso foi realizado em uma empresa especializada na produção de calçados. Para a implementação do modelo foi utilizado o software Microsoft Office Excel 2007, através da ferramenta *Solver*, a qual utiliza o algoritmo Gradiente reduzido generalizado. Após o cálculo do balanceamento ótimo, as respostas foram utilizadas como base para o projeto do arranjo físico. Os resultados mostram que ocorreu uma diminuição considerável do tempo ciclo, uma diminuição da ociosidade da linha e um maior aproveitamento da estrutura.

**Palavras-chave:** Balanceamento da linha de montagem. Programação não linear inteira. Otimização. Projeto de arranjo físico.

## ABSTRACT

This paper aims to present the study and research to create a mathematical model based on integer nonlinear programming, for use in balancing problem in an assembly line. The use of this model defines the optimal solution, taking into account the limitation of the belt assembly and use more than 85% of the workforce. The case study was conducted in a company that specializes in footwear production. To implement the model we used the software Microsoft Office Excel 2007 through the Solver tool, which uses the generalized reduced gradient algorithm. After calculating the optimal balancing responses were used as a basis for the design of the physical layout. The results show that there was a considerable reduction of the cycle time, a decrease in the idle line, and a greater utilization of the structure.

**Keywords:** Balancing assembly line. Integer nonlinear programming. Optimization, facility layout.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do modelo caixa-preta.....	19
Figura 2 – Tipos de layout.....	21
Figura 3 – Posicionamento dos vários tipos de sistemas de produção em função do perfil da procura .....	22
Figura 4 – Arranjo físico posicional.....	23
Figura 5 – Arranjo físico por processo .....	24
Figura 6 – Arranjo físico por produto.....	25
Figura 7 – Arranjo físico celular.....	26
Figura 8 – Tipos básicos de problemas de balanceamento de linhas de montagem.....	30
Figura 9 – Layout atual da linha de montagem (distâncias em centímetros) .....	41
Figura 10 – Metodologia utilizada pelos analistas de processos .....	43
Figura 11 – Tela do <i>Solver</i> para inserir informações do modelo.....	47
Figura 12 – Layout proposto da linha de montagem (distâncias em centímetros).....	52

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Capacidade produtiva (pares/hora).....	49
Gráfico 2 – Eficiência atual (%).....	50
Gráfico 3 – Eficiência proposta (%).....	50
Gráfico 4 – Situação atual x Situação proposta.....	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Terminologia da análise de linha de produção .....	28
Quadro 2 – Comparativo dos conceitos.....	38
Quadro 3 – Componentes da sandália .....	38
Quadro 4 – Relação de precedência .....	39
Quadro 5 – Exemplo da disposição da função objetivo e variáveis de decisão .....	40
Quadro 6 – Exemplo da disposição das restrições de mão de obra.....	46
Quadro 7 – Exemplo da disposição da restrição do espaço.....	47
Quadro 8 – Relação de dependência entre postos de trabalho e equipamentos de secagem ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos resultados .....	49
Tabela 2 – Comparativo entre o modelo proposto e o atual .....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B&B	<i>Branch-and-Bound</i>
GALBP	<i>Generalized assembly line balancing problem</i>
GRG	Gradiente reduzido generalizado
MMD	<i>Multi-model deterministic</i>
MMS	<i>Multi-model stochastic</i>
PI	Programação inteira
PNL	Programação não linear
PNLI	Programação não linear inteira
SALBP	<i>Simple assembly line balancing problem</i>
SMD	<i>Single-model deterministic</i>
SMS	<i>Single-model stochastic</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X_k$	Variável aleatória
$r_k$	Variável aleatória
$\nabla$	Gradiente
$TC$	Tempo ciclo
$MO$	Mão de obra real
$MON$	Mão de obra necessária
$P$	Padrão hora da linha de montagem
$PH_n$	Padrão hora da operação
$MP$	Metragem do posto de trabalho
$ME$	Metragem do equipamento
$MS$	Metragem da secagem
$\in$	Pertence a
$\forall$	Para todo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Contexto e justificativa do problema em estudo .....	15
1.2	Objetivo.....	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos .....	16
1.3	Importância do trabalho .....	16
1.4	Metodologia da pesquisa.....	16
1.5	Estrutura do trabalho .....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
2.1	Tomada de decisão.....	18
2.2	Planejamento e projeto de arranjo físico .....	20
2.3	Linhas de montagem .....	26
2.3.1	Takt time e tempo ciclo.....	27
2.3.2	Balanceamento de linha de montagem.....	28
2.4	Programação não linear inteira.....	30
2.5	Algoritmos de resolução .....	33
2.5.1	Método do gradiente .....	33
2.5.2	Gradiente reduzido generalizado.....	34
3	ESTUDO DE CASO .....	36
3.1	Etapas .....	36
3.1.1	Etapa 1 – Caracterização da Empresa .....	36
3.1.2	Etapa 2 – Descrição do processo atual e coleta de dados .....	36
3.1.3	Etapa 3 – Cálculo do balanceamento ótimo.....	36
3.1.4	Etapa 4 - Desenvolvimento do balanceamento ótimo e resultados.....	36
3.1.5	Etapa 5 – Projeto do layout .....	37
3.2	Desenvolvimentos do estudo de caso.....	37
3.2.1	Etapa 1 – Caracterização da Empresa.....	37
3.2.2	Etapa 2 – Descrição atual do processo e coleta de dados .....	38
3.2.3	Etapa 3 – Cálculo do balanceamento ótimo.....	43
3.2.4	Etapa 4 – Desenvolvimento do balanceamento ótimo e resultados .....	48
3.2.5	Etapa 5 – Projeto do layout .....	51
3.3	Considerações finais do estudo de caso .....	53

4	CONCLUSÃO .....	55
	REFERÊNCIAS .....	56
	APÊNDICE.....	58



# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo traz uma compreensão inicial do trabalho, descrevendo o contexto, no qual o problema está inserido, o objetivo geral e os objetivos específicos para o estudo do caso proposto.

## 1.1 Contexto e justificativa do problema em estudo

A busca pela melhoria contínua faz parte da cultura das empresas líderes nos dias atuais. Este princípio surgiu através da criação do *kaizen*, por meio do sistema Toyota de produção, que permeia desde o início da década de 50.

Com este interesse a indústria calçadista tem buscado, através da Engenharia, o aperfeiçoamento dos seus processos produtivos, para o aumento da eficiência produtiva. Este trabalho propõe uma alternativa no método de tomada de decisão para melhorias, serão utilizados princípios da Pesquisa Operacional para o balanceamento em uma linha de montagem.

Um dos principais fatores que influenciam na ineficiência fabril é o *trade off* entre o dimensionamento da mão de obra e o *takt time* nas linhas de montagem, podendo gerar altos custos com mão de obra, se a taxa de produção for relativamente pequena. Para mensurar essa relação entre mão de obra e *takt time* é usado o tempo ciclo como parâmetro de melhorias, ou seja, só é considerado melhoria se o tempo ciclo diminuir. Esta ação tem sido um desafio para a indústria calçadista, pois as falhas neste balanceamento podem gerar ociosidade na mão de obra ou um *takt time* menor que o necessário, ou seja, não satisfazendo a demanda, ou maior que o necessário, gerando, portanto, estoques.

Este trabalho foi proposto baseado no seguinte problema: Como balancear a linha de montagem com o melhor aproveitamento da mão de obra e gerando o menor tempo ciclo possível, levando em consideração os limites de espaços de uma esteira de montagem?

## 1.2 Objetivo

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização para auxiliar no balanceamento de uma linha de montagem, respeitando as restrições de espaço e eficiência da mão de obra.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos estão descritos a seguir:

- Minimizar o tempo ciclo da linha de montagem;
- Dimensionar a linha de montagem pelo cálculo do balanceamento ótimo;
- Projetar o arranjo físico com base no balanceamento obtido por meio do modelo de otimização.

### **1.3 Importância do trabalho**

A indústria calçadista passa, constantemente, por mudanças, necessitando que os seus gestores tomem decisões, que afetam diretamente a eficiência de suas fábricas. Nesse contexto, ter uma base para a tomada de decisões podem levar os gestores para as melhores escolhas.

Portanto, para auxiliar nesta tomada de decisão este trabalho proposto tem como finalidade utilizar conceitos da pesquisa operacional para a criação de um modelo, que por sua vez, gerará resultados, no qual, será utilizado como base para tais decisões. Além disto, o método utilizado, atualmente, é empírico, através de tentativa e erro.

Ao utilizar as técnicas propostas por esse estudo, identifica-se a melhor configuração da linha de montagem, de acordo com os parâmetros estabelecidos. Isto auxiliará o trabalho dos analistas de processos, que são responsáveis pelo balanceamento. A importância deste trabalho é confirmada por Santos e Wagner (2008, p. 4):

Atualmente os gerentes e pessoas envolvidas nos diversos processos decisórios das organizações necessitam de suporte (mesmo científico) para que aconteça de uma forma mais satisfatória. Esse processo precisa ser bem compreendido e ferramentas, métodos e modelos precisam estar disponíveis no momento da tomada de decisão.

### **1.4 Metodologia da pesquisa**

O estudo proposto inicia-se com uma fundamentação teórica, abordando bibliografias referentes a Pesquisa Operacional, Programação Não Linear, balanceamento em linhas de produção e arranjos físicos, através de fontes como artigos, livros e páginas da web. Após esta etapa, serão coletados os dados referentes à linha de montagem, como por exemplo: Quantidade de operações e seus respectivos padrões de cronoanálise, quais são os posto de

trabalho de cada operação e suas respectivas metragens, tempo ciclo e as precedências de cada operação.

Em seguida, será criado um modelo matemático de programação não linear para a otimização do balanceamento da linha, através da ferramenta *Solver* usando o programa Microsoft Office Excel 2007. Por fim, realiza-se a análise dos resultados, comparando-os com o balanceamento atual da linha.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

O trabalho é constituído por cinco capítulos, descritos da seguinte forma e ordem: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Estudo de Caso e Conclusão.

No primeiro capítulo, Introdução, foi abordada a contextualização do estudo proposto, apresentando os objetivos gerais e específicos e sua justificativa. O capítulo descreve, também, a estrutura de todos os cinco capítulos presente neste trabalho.

No segundo capítulo, Fundamentação Teórica, são descritos, definidos e discutidos todos os conceitos necessários para a realização do estudo proposto. A monografia, basicamente, traz definições nas seguintes áreas: Balanceamento em linhas de produção, arranjos físicos e pesquisa operacional. Os conceitos de programação não Linear serão abordados, amplamente, devido a sua importância do estudo de caso.

No terceiro capítulo, Estudo de Caso, expõe a forma como foram aplicados os conceitos abordados no segundo capítulo, Fundamentação Teórica, para a criação de um modelo de otimização para o balanceamento de uma linha produtiva. Relata a aplicação do modelo de otimização em uma linha de montagem. São mostrados e avaliados os resultados do dimensionamento da mão de obra e o *takt time* da linha, proposto pelo modelo criado, levando em consideração os ganhos obtidos pela empresa.

No quarto capítulo, conclusão, são apresentadas as considerações finais do trabalho, através, de uma avaliação dos objetivos, descrito no capítulo inicial, e de diretrizes para futuras aplicações.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará os conceitos e definições a respeito das principais áreas que auxiliarão nesse trabalho: Tomada de Decisão, Projeto de arranjo físico, Linha de montagem e Programação Não Linear Inteira.

### 2.1 Tomada de decisão

De acordo com Moreira (2011), a análise de problemas de decisão é geralmente levada a efeito de modelos matemáticos, que são representações simbólicas do problema em questão; o que se faz é procurar enquadrar o problema em um de muitos modelos já disponíveis e de utilidade comprovada.

Para o aprimoramento da tomada de decisão, Santos e Wagner (2008) propõe que se deve realizar um maior número de pesquisas empírica a respeito destes processos realizados nas organizações podendo ser descritas todas suas etapas e metodologias empregadas não só para acarretar experiência, mas também para serem analisadas a luz do conhecimento técnico de processo decisório e gerarem novos conhecimentos e aprimorarem as teorias e os modelos disponíveis. Lachtermacher (2009, p. 5) afirma:

Diversas vantagens podem ser citadas quando o decisor utiliza um processo de modelagem para a tomada de decisão: i) Os modelos forçam os decisores a tornarem explícitos seus objetivos. ii) Os modelos forçam a identificação e o armazenamento das diferentes decisões que influenciam os objetivos. iii) Os modelos forçam a identificação e o armazenamento dos relacionamentos entre as decisões. iv) Os modelos forçam a identificação das variáveis a serem incluídas e em que termos elas serão quantificáveis. v) Os modelos forçam o reconhecimento de limitações. vi) Os modelos permitem a comunicação de suas idéias e seu entendimento para facilitar o trabalho de grupo.

A tomada de decisão tem sido baseada, muitas vezes, apenas na subjetividade do gestor e na sua experiência. Há novos métodos para auxiliar nas decisões e o mais eficaz é a construção de modelos, ou seja, analisando de forma quantitativa o problema em questão. Este método de análise quantitativo é dividido em cinco etapas, conforme descrito a seguir:

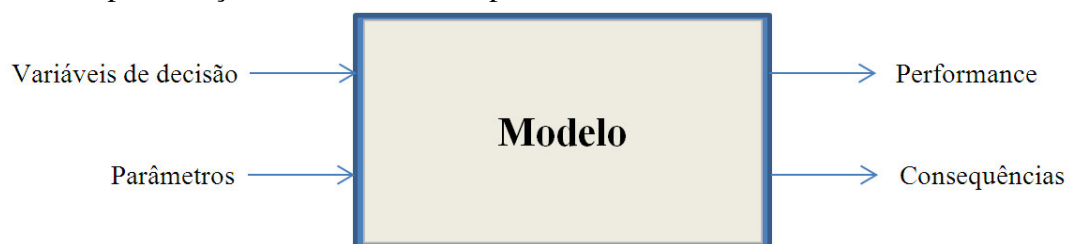
- a) Definição do problema;
- b) Desenvolvimento do modelo;
- c) Preparação dos dados;
- d) Solução do modelo;
- e) Relatório dos resultados.

Moreira (2011) destaca a necessidade de um grande esforço no sentido de transformar descrições genéricas em um problema bem estruturado que possa ser atacado quantitativamente.

Gomes e Gomes (2012) afirmam que para a correta formulação do problema, é necessário constatar os fatores que influenciam o problema, bem como se torna necessário estudar o meio ambiente e identificar as restrições. Estas podem ser financeiras, econômicas, legais, políticas, materiais, temporais, de pessoal etc.

Segundo Lachtermacher (2009), a maneira mais simples de representar um modelo simbólico é denominada modelo caixa-preta. Nesse tipo de representação, apenas variáveis explicativas (de decisão), parâmetros e medidas de performance ou consequência são representados (variáveis dependentes). As relações entre elas são omitidas. A Figura 1 representa esse tipo de representação:

Figura 1 – Representação do modelo caixa-preta



Fonte: Adaptado de Lachtermacher (2009).

No desenvolvimento do modelo, segundo Ragsdale (2009), deve-se selecionar uma técnica de modelagem adequada da ciência do gerenciamento. A meta no estágio de formulação do modelo é selecionar uma técnica de modelagem que seja adequada ao problema, em vez de tentar adequar seu problema ao formato requerido de uma técnica de modelagem pré-selecionada.

De acordo com Moreira (2011), os modelos são representações, frequentemente, simplificadas de objetos e situações reais. Podem ser de três tipos:

- a) Icônicos: são réplicas físicas de um objeto real em tamanho diferente ou não;
- b) Analógicos: também são modelos físicos, mas não guardam a forma do objeto que está sendo representado;
- c) Matemáticos: são aqueles em que a situação problema ou as propriedades de um objeto são representadas por um sistema de símbolos e relações matemáticas, como equações e inequações, passíveis de manipulação na busca de uma solução ou no estudo do comportamento do objeto sob certas condições.

A preparação dos dados consiste em determinar as variáveis, conforme relata Moreira (2011):

O que se faz normalmente é representar as variáveis por um sistema de notações, ou seja, letras e símbolos, e desenvolver o modelo. Após isso, podem buscar separadamente os dados necessários, o que talvez seja uma tarefa árdua se o problema apresentar muitas variáveis.

Ragsdale (2009) afirma que após a preparação dos dados a próxima etapa é implementar essa formulação como um modelo de planilha. Para Moreira (2011), solucionar o problema significa tentar especificar os valores das variáveis que forneçam a melhor saída do modelo segundo critérios predefinidos. Esses valores das variáveis de decisão são chamados de solução ótima.

Após a solução do problema é importante o uso de relatórios para ter uma análise mais criteriosa quanto aos resultados. Segundo Lachtermacher (2009), há, basicamente, três relatórios de resultados, descritos a seguir:

- a) Relatório de respostas: Indica o tipo de problema de otimização tratado (maximização ou minimização) e o valor inicial e final da função objetivo, antes e depois da otimização;
- b) Relatório de limites: Apresenta o valor da função objetivo na solução ótima, variáveis de decisão e seus valores na solução ótima e a variação possível dos valores das variáveis de decisão e função objetivo;
- c) Relatório de sensibilidade: Fornece as mudanças que podem ocorrer nos coeficientes das variáveis de decisão e da sua função objetivo e das possíveis alterações que as constantes das restrições podem sofrer.

## **2.2 Planejamento e projeto de arranjo físico**

Slack, Chambers e Johnston (2002, p. 201) definem arranjo físico como “a manifestação física de um tipo de processo, onde se preocupa com o posicionamento físico dos recursos de transformação”. A definição do arranjo físico é decidir onde colocar todas as instalações, máquinas, equipamentos e pessoal da produção, também é determinar a maneira segundo a qual os recursos transformados fluem pela operação.

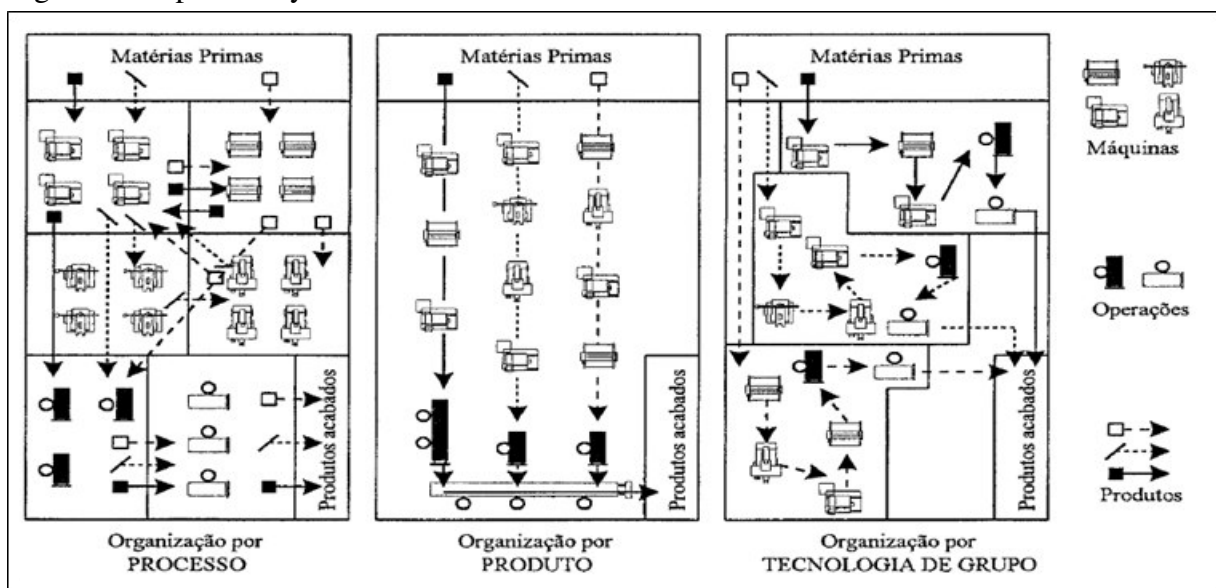
O tempo despendido no planejamento do arranjo físico antes de sua implantação evita que as perdas assumam grandes proporções e permite a todas as modificações se integrem segundo um programa global e coerente que permite o estabelecimento de uma sequência lógica para as mudanças, além de facilitá-las. (MUTHER, 1978, p. 1)

No entendimento de Muther (1978), os problemas de arranjo físico se baseiam em dois elementos básicos: produto e quantidade (volume). Os quais estes elementos são responsáveis por todas as características, fatores e condições do planejamento. De acordo com Leite e Diniz (2008, p. 2):

[...] planejar um arranjo físico pode parecer apenas à locação de máquinas e/ou equipamentos para que se chegue a um layout satisfatório, mas na realidade a desobediência de alguma regra ou fator importante para o processo pode acarretar desperdício e prejuízo para a empresa. Assim, um arranjo físico não planejado corretamente pode ocasionar: ineficiência de operações, gargalos com perda de tempo para a produção, longas distâncias entre os centros com perca através dos transportes ou movimentações excessivas dos materiais e operários, ociosidade dos equipamentos e/ou máquinas, excesso de áreas com perca de recursos na utilização da edificação ou terreno, entre outros problemas decorrentes de um layout deficiente.

Para Gonçalves Filho (2005), os tipos de arranjo físicos mais frequentes são classificados em: a) Arranjo físico posicional; b) Arranjo físico por produto; c) Arranjo físico celular; d) Arranjo físico por processo. Segundo Simaria (2001), as classificações dos sistemas de produção, de acordo com a abordagem utilizada para agrupar os processos de fabricação e, conseqüentemente, definir a configuração da implantação fabril (Figura 2), são: (i) posição fixa (do produto), (ii) processo, (iii) tecnologia de grupo e (iv) produto. Slack, Chambers e Johnston (2002) classificam os tipos básicos de arranjos físicos em: Arranjo físico posicional; Arranjo físico por processo; Arranjo físico celular; Arranjo físico por produto; Arranjo físico misto.

Figura 2 – Tipos de layout

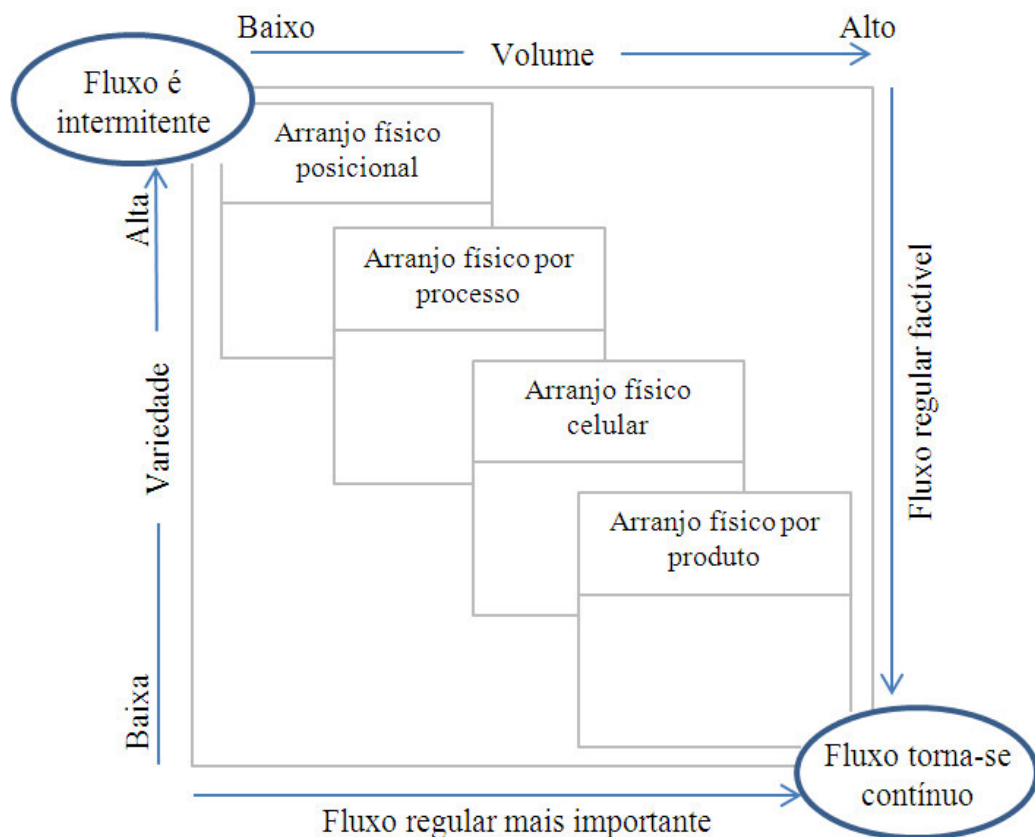


Fonte: Simaria (2001).

Os arranjos físicos devem se adaptar a realidade produtiva da indústria, baseada em sua demanda e variedades de produtos, para que tempos desnecessário de movimentação sejam eliminados.

Slack, Chambers e Johnston (2002) afirmam que a importância do fluxo para uma operação dependerá de suas características de volume e variedade. A Figura 3 ilustra um perfil entre a quantidade de procura e a variedade de produto a cada um dos sistemas de produção:

Figura 3 – Posicionamento dos vários tipos de sistemas de produção em função do perfil da procura



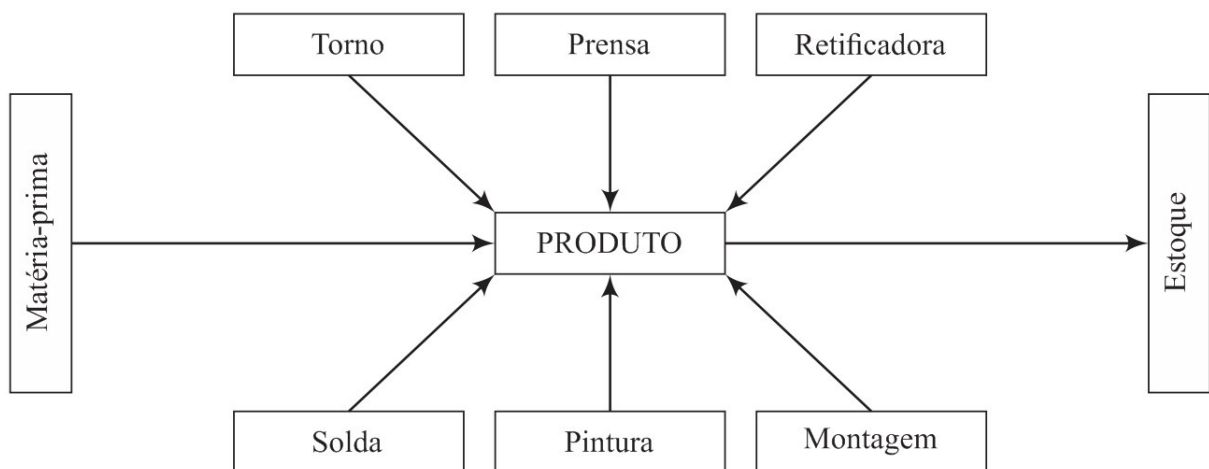
Fonte: Adaptado de Slack, Chambers e Johnston (2002).

Slack, Chambers e Johnston (2002) caracterizam o arranjo físico posicional (Figura 4), descrevendo que em vez de materiais, informações ou que clientes fluírem através de uma operação, quem sofre o processamento fica estacionário, enquanto equipamento, maquinário, instalações e pessoas movem-se para a cena do processamento na medida do necessário. Este tipo de arranjo é justificado pelo tamanho do produto, o qual é inconveniente a sua movimentação.



Gorgulho Junior (2010) resume as características do arranjo físico posicional da seguinte forma: Movimentação reduzida de material; Aumento da movimentação de pessoal e equipamentos; Pode resultar em equipamentos duplicados; Requer grande habilidade do pessoal; Requer supervisão geral; Pode resultar em aumento de espaço e grande material em processo; Requer grande atenção no controle e na programação da produção; Produção pequena; Grande flexibilidade que permite alterações no projeto do produto, no volume da produção e até do tipo do produto.

Figura 4 – Arranjo físico posicional

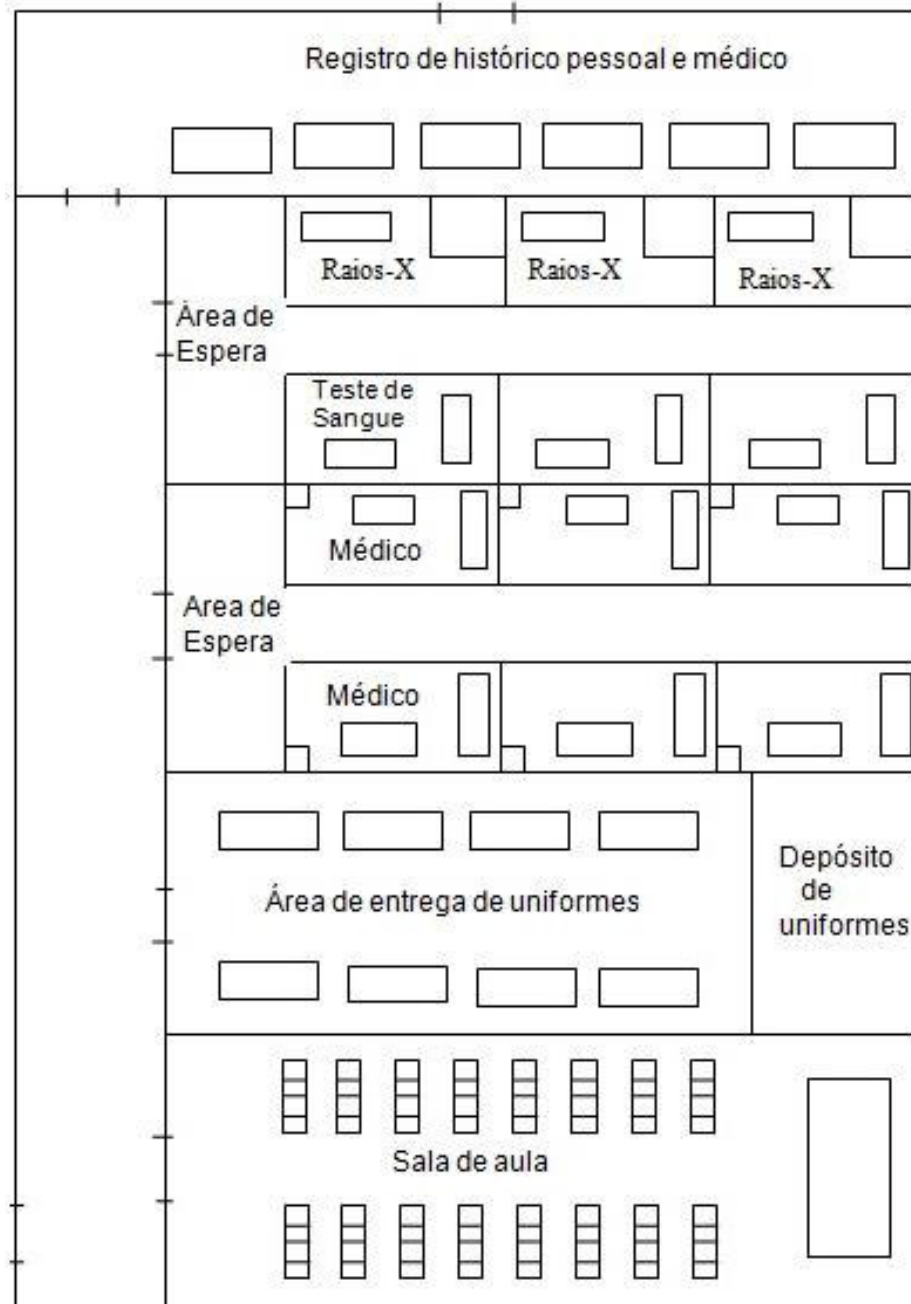


Fonte: Adaptado de Gonçalves Filho (2005).

Simaria (2001) afirma que, nos sistemas de produção por processo, os equipamentos são agrupados em departamentos de acordo com a sua funcionalidade. Para Gonçalves Filho (2005), o arranjo por processo (Figura 5) é constituído por processos similares que são agrupados em um mesmo local físico da planta. A razão pode ser que seja conveniente para a operação mantê-los juntos, ou que dessa forma a utilização dos recursos transformadores seja beneficiada. Isso significa que, quando produtos, informações ou clientes fluírem através da operação, eles percorrerão um roteiro de processo a processo de acordo com suas necessidades.

Em resumo as características do arranjo físico por processo são descritas a seguir, de acordo com Gorgulho Junior (2010): Manuseio elevado de material; Complexo controle de produção; Grande quantidade de material em processo; Máquina de uso em geral; Pequeno investimento total inicial; Grande flexibilidade; Baixa produtividade; Facilidade de contornar quebras de equipamentos; O operador deve ter maiores habilidades; Grande utilização das máquinas.

Figura 5 – Arranjo físico por processo



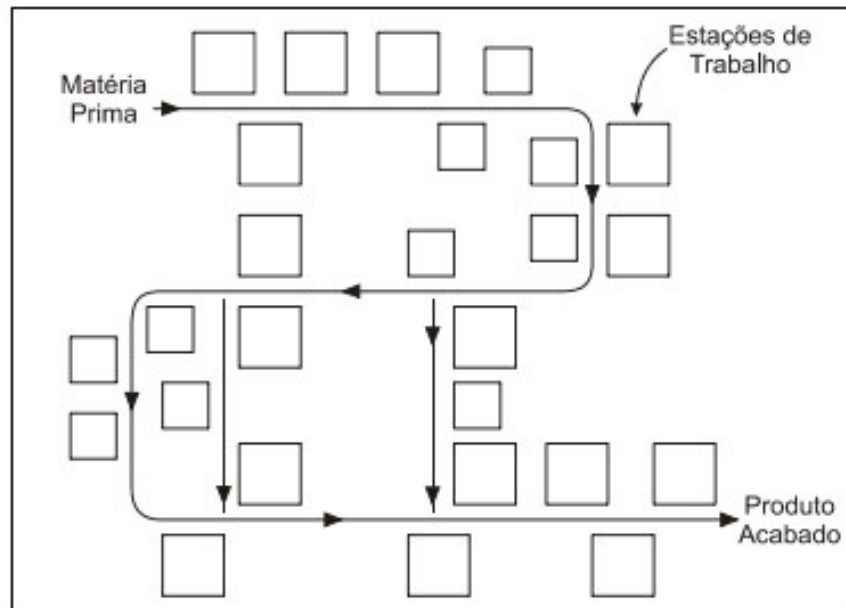
Fonte: Gonçalves Filho (2005).

Slack, Chambers e Johnston (2002) afirmam que arranjo físico por produto envolve localizar os recursos produtivos transformadores inteiramente segundo a melhor conveniência do recurso que está sendo transformado. Sendo que cada produto, informação ou cliente segue um roteiro predefinido que coincide com a sequência na qual os processos foram arranjados fisicamente.

Para Gorgulho Junior (2010), as características do arranjo físico por produto (Figura 6) são resumidas nos seguintes aspectos: Manuseio reduzido de material; Simples

controle de produção; Pequena quantidade de material em processo; Uso de equipamentos especiais; Investimento total inicial elevado; Baixa flexibilidade; Mudanças no produto podem levar a obsolescência da linha; Grande produtividade; Se uma máquina para a linha toda interrompe suas atividades; Requer menor habilidade do pessoal; As atividades são específicas e repetitivas.

Figura 6 – Arranjo físico por produto



Fonte: Groover (1987 *apud* GORGULHO JÚNIOR, 2010).

De acordo com Simaria (2001), na configuração dos sistemas de produção por tecnologia de grupo, os equipamentos são associados por forma a que cada grupo (célula de produção) seja majoritariamente, se não exclusivamente, dedicado ao processamento de uma família de componentes. Para Gonçalves Filho (2005), o arranjo físico celular consiste no agrupamento de recursos de transformação em um determinado local da planta com o objetivo de processar uma família de produtos similares. Esta similaridade pode ser, por exemplo, em termos de operações de fabricação e/ou de forma geométrica.

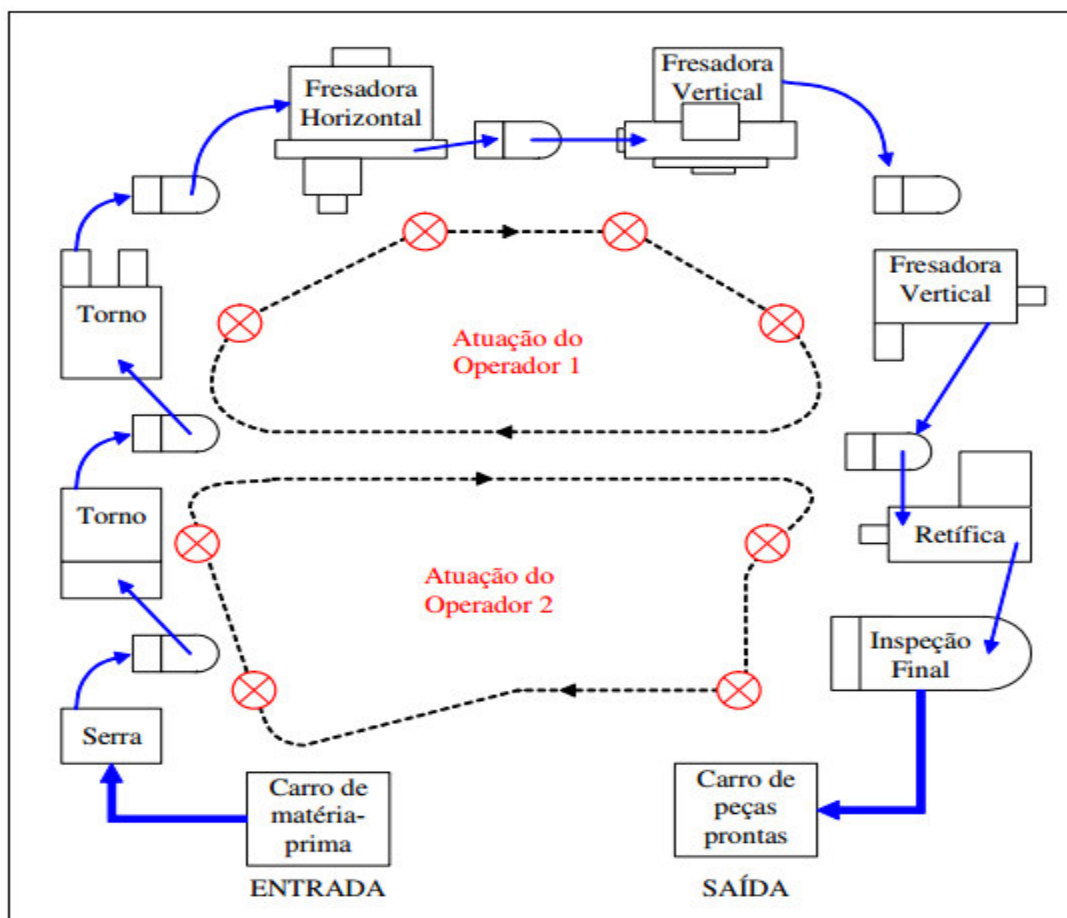
Groover (1987 *apud* GORGULHO JÚNIOR, 2010) destaca as seguintes características do arranjo físico celular: As máquinas são dispostas na sequência do processo; Normalmente a célula é projetada em forma U; Um tipo de peça é feito de cada vez dentro da célula; Os trabalhadores são treinados para lidar com mais de um tipo de processo; O tempo de ciclo para o sistema dita a taxa de produção para a célula; Os operadores trabalham em pé e caminhando; São usadas máquinas mais lentas e específicas, que são menores e mais baratas.

Slack, Chambers e Johnston (2002) incluem como exemplificação do arranjo físico celular (Figura 7) nas seguintes áreas:

- Empresas manufatureiras de componentes de computador
- Áreas para produtos específicos em supermercados
- Maternidade em um hospital.

Embora a ideia de arranjo físico celular seja em geral associada à operação de manufatura, os mesmos princípios podem ser, e são usados em serviços.

Figura 7 – Arranjo físico celular



Fonte: Groover (1987 *apud* GORGULHO JÚNIOR, 2010).

### 2.3 Linhas de montagem

Davis, Aquilano e Chase (2000) definem linha de montagem como uma série de estações de trabalho, cada uma com um intervalo de tempo uniforme chamado de tempo de ciclo. Em cada estação de trabalho, o trabalho é executado em um produto através do acréscimo de peças e/ou pela conclusão da operação de montagem. O trabalho realizado em

cada estação é composto de muitas tarefas, também chamadas de elementos ou unidades de trabalho.

Para Ghosh e Gagnon (1989 *apud* FARNES, 2008), uma linha de montagem pode ser definida como um conjunto finito de elementos de trabalho ou tarefas, cada uma tendo um tempo de processamento de operação e um conjunto de relações de precedência que especificam a ordem permitida das tarefas.

Becker e Scholl (2003 *apud* CRISTO, 2010) definem de forma detalhada linha de montagem como um conjunto de estações distribuídas de forma sequenciada e conectadas por um dispositivo de movimentação de materiais. Os elementos a serem processados são então alimentados na primeira estação. Eles passam para as estações seguintes em intervalos de tempo determinados, chamados de tempo de ciclo, até atingir o último posto de trabalho. As estações por sua vez reúnem certo número de atividades que são repetidas, dentro do tempo de ciclo, no processamento de cada novo elemento.

De acordo com Simaria (2001), uma linha de montagem é um conjunto de postos de trabalho dispostos sequencialmente e interligados por um sistema de transporte de materiais. Em cada posto de trabalho é executado um conjunto de tarefas (ou operações) pré-especificadas num processo de montagem, apresentado os seguintes aspectos:

- a) Tempo de processamento da tarefa: o tempo requerido para executar uma dada tarefa,
- b) Restrições de precedência: o conjunto de restrições que determina a sequência segundo a qual as tarefas podem ser executadas; as restrições de precedência são definidas por aspectos tecnológicos ou de concepção do produto.

### **2.3.1 *Takt time e tempo ciclo***

Nesta etapa do trabalho, esclarecem-se os conceitos de *takt time* e tempo ciclo, os quais são de suma importância em uma linha de montagem e para entendimento do trabalho proposto.

Segundo Alvarez e Antunes Jr. (2001), o *takt time* é o ritmo de produção necessário para atender a um determinado nível considerado de demanda, dadas as restrições de capacidade da linha ou célula.

Concretamente, o *takt-time* é o ritmo de produção alocado para a produção de uma peça ou produto em uma linha ou célula, com a diferença que se reconhece explicitamente nesta definição que o ritmo eventualmente necessário pode não ser suportado pelo sistema de produção. (IWAYAMA, 1997 *apud* ALVAREZ; ANTUNES JR., 2001).

O tempo de ciclo da linha ou célula é o tempo de execução da operação, ou das operações, na máquina/posto mais lento; em outras palavras, é o ritmo máximo possível, mantidas as condições atuais. O tempo de ciclo da linha ou célula é definido pelas características dos equipamentos e peças e pela configuração da linha ou célula – alocação de trabalhadores aos postos de trabalho. (ALVAREZ; ANTUNES JR., 2001, p. 8).

### 2.3.2 Balanceamento de linha de montagem

Gaither e Frazier (2002) definem balanceamento de linhas como a análise de linhas de produção que divide igualmente o trabalho a ser feito entre estações de trabalho, a fim de que o número de estações de trabalhos necessário na linha de produção seja minimizado. O Quadro 1 resume alguns dos termos frequentemente usados no balanceamento de linha.

Quadro 1 – Terminologia da análise de linha de produção

<b>Tarefas</b>	Elementos de trabalho. Pegar um lápis, posicionar o lápis sobre um papel para escrever e escrever um número é um exemplo de tarefa.
<b>Precedência da tarefa</b>	A sequência ou ordem em que as tarefas devem ser executadas. A precedência de cada tarefa é conhecida a partir de uma lista das tarefas que devem precedê-la imediatamente.
<b>Duração de tarefa</b>	A quantidade de tempo necessária para que um trabalhador bem treinado ou máquina não assistida executem uma tarefa. As durações de tarefas normalmente são expressas em minutos.
<b>Tempo ciclo</b>	O tempo em minutos entre cada produto que sai no final de uma linha de produção.
<b>Tempo produtivo por hora</b>	O número de minutos que uma estação de trabalho opera em média a cada hora. Uma estação de trabalho pode não estar em operação devido ao almoço, tempo pessoal, quebras, troca de ferramental e paralisações.
<b>Estação de trabalho</b>	Localização física onde um conjunto particular de tarefas é executado. As estações de trabalho normalmente são de dois tipos: uma estação de trabalho tripulada, que contém um trabalhador que opera máquina e/ou ferramentas, e uma estação de trabalho não tripulada, que contém máquinas não assistidas, como robôs.
<b>Centro de trabalho</b>	Uma localização física onde duas ou mais estações de trabalhos idênticas estão localizadas. Se for exigido que mais de uma estação de trabalho ofereça capacidade de produção suficiente, elas serão combinadas para formar um centro de trabalho.
<b>Número de estações de trabalho em funcionamento</b>	A quantidade de trabalho a ser feita no centro de trabalho, expressa em número de estações de trabalho. vinte e oito horas de trabalho num centro de trabalho durante um turno de 8 horas seria equivalente a 28/8, ou 3,5 estações de trabalho operando.
<b>Número mínimo de estações de trabalho</b>	O menor número de estações de trabalho que podem fornecer a produção exigida.
<b>Número real de estações de trabalho</b>	O número total de estações de trabalho necessárias na linha de produção inteira, calculadas como o próximo valor inteiro mais alto do número de estações de trabalho em funcionamento.
<b>Utilização</b>	A porcentagem do tempo que uma linha de produção trabalha.

Fonte: Adaptado de Gaither e Frazier (2002).

Balanceamento de uma linha de montagem, segundo Cristo (2010, p. 12), é “encontrar aquela sequência que aperfeiçoe uma determinada medida de desempenho, como

por exemplo, minimizar o número de estações de trabalho ou o tempo de ciclo, ou então maximizar a eficiência da linha ou a sua rentabilidade”.

Para Farnes e Pereira (2007), balancear uma linha significa atribuir tarefas às estações de trabalho, para otimizar uma medida de desempenho. Usualmente, a medida de desempenho relaciona-se ou com o número de estações, minimizando os custos de produção, ou com o tempo de ciclo, maximizando a taxa de produção por eliminar tempos ociosos nas estações.

De acordo com Davis, Aquilano e Chase (2000), o balanceamento da linha de montagem pode ser dividido nas seguintes etapas:

- a) Especificar a relação sequencial entre as tarefas utilizando um diagrama de precedência;
- b) Determinar o tempo de ciclo necessário;
- c) Determinar o número mínimo teórico de estações de trabalho requerido para satisfazer a restrição de tempo de ciclo;
- d) Selecionar uma regra básica na qual as tarefas têm de ser alocadas às estações de trabalho e uma regra secundária para desempatar;
- e) Delegar tarefas, uma de cada vez, à primeira estação até que a soma dos tempos de tarefas seja igual ao do tempo de ciclo, ou nenhuma outra tarefa será viável devido às restrições de tempo ou de sequência. Repetir o processo até que todas as tarefas sejam designadas.
- f) Avaliar a eficiência da linha de montagem resultante;
- g) Se a eficiência é insatisfatória, rebalancear a linha utilizando uma regra diferente de decisão.

Fernandes *et al.* (2008) destacam duas classificações a respeito dos problemas de balanceamento de linha. A primeira dela divide os problemas de balanceamento de linha de montagem em quatro categorias:

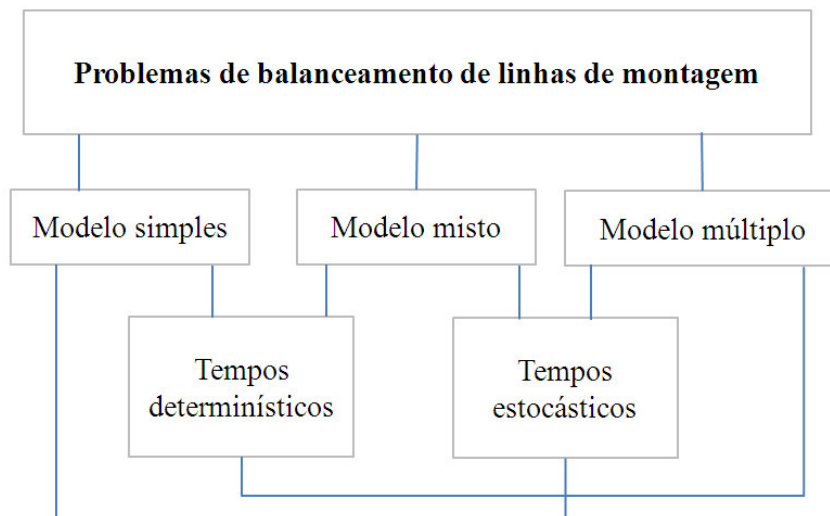
- a) problemas para um único modelo com tempos das tarefas determinísticos (*single-model deterministic*, sigla SMD);
- b) problemas para um único modelo com tempos de tarefas estocásticos (*single-model stochastic*, sigla SMS);
- c) problemas para múltiplos modelos com tempos das tarefas determinísticos (*multi-model deterministic*, sigla MMD);
- d) problemas para múltiplos modelos e tempos das tarefas estocásticos (*multi-model stochastic*, sigla MMS).

A outra classificação divide os problemas de balanceamento de linhas em duas categorias:

- a) problema de balanceamento de linha de montagem simples (*simple assembly line balancing problem*, sigla SALBP): onde o termo *simple* indica que nenhuma restrição é relaxada.
- b) problema de balanceamento de linha de montagem generalizado (*generalized assembly line balancing problem*, sigla GALBP): onde se encaixam os problemas de balanceamento de linha que objetivam resolver problemas com algumas características adicionais (inclusive algumas restrições do SALBP podem ser relaxadas) tais como: i) possibilidade de seleção de equipamentos ou de processos; ii) agregação de estações de trabalho ou estações de trabalho com máquinas em paralelo; iii) linha de montagem com layout em formato U; iv) tempos de tarefas estocásticos; v) recursos limitados; vi) outras características.

Devido à diversificação das estruturas fabris o problema de balanceamento pode aparecer de várias fôrmas. A Figura 8 ilustra os tipos básicos de problemas de balanceamento de linhas de montagem:

Figura 8 – Tipos básicos de problemas de balanceamento de linhas de montagem



Fonte: Adaptado de Simaria (2001).

## 2.4 Programação não linear inteira

Uma das técnicas mais eficientes para o problema de balanceamento de linha de montagem é o uso da Programação Não Linear, na qual constitui uma das áreas da Pesquisa Operacional. Segundo Colin (2011), os conceitos chaves que ajudarão no entendimento do estudo são constituídos, basicamente, por seis elementos:



- a) Modelo: é uma representação simplificada do comportamento da realidade expressa na forma de equações matemáticas que serve para simular a realidade.
- b) Função-objetivo: É uma função matemática que representa o principal objetivo do tomador de decisão. Ela é de dois tipos: ou de minimização (de custos, erros, chance de perda, desvio do objetivo etc.) ou de maximização (de lucro, receita, utilidade, bem-estar, riqueza, chance de sobrevivência etc.).
- c) Variáveis de decisão: São as variáveis utilizadas no modelo que podem ser controladas pelo tomador de decisão. A solução do problema é encontrada testando-se diversos valores das variáveis de decisão.
- d) Restrições: São regras que dizem o que se pode (ou não) fazer e/ou quais são as limitações dos recursos ou das atividades que estão associados ao modelo.
- e) Parâmetros: São variáveis utilizadas no modelo que não podem ser controladas pelo tomador de decisão. A solução do problema é encontrada admitindo como fixo os valores dos parâmetros.
- f) Algoritmo: É uma sequência de instruções que para uma determinada entrada gera um determinado resultado.

Para Lachtermacher (2009), problemas de otimização em que a função objetivo e/ou pelo menos uma das restrições envolvidas não são funções lineares das variáveis de decisão são denominados problemas de programação não linear (PNL). O formato padrão de um problema de programação não linear com restrições e  $n$  variáveis é dado por Hillier e Lieberman (2010):

Maximizar (ou minimizar)  $f(x)$ ,

sujeito a:  $g_i(x) \leq b_i$ ,

para  $i = 1, 2, \dots, m$

e  $x \geq 0$ ,

em que  $f(x)$  e os  $g(x)$  são funções dadas das  $n$  variáveis de decisões.

Conforme os referidos autores, os problemas de programação não linear se apresentam em muitas formas e formatos diferentes. Por isso, foram desenvolvidos algoritmos para várias classes (tipos especiais) individuais de problemas de PNL. As classes mais importantes estão descritas a seguir:

- a) Otimização Irrestrita: Problemas de otimização irrestritas são aquelas que não possuem restrições.

- b) Otimização Linearmente Restrita: Problemas de otimização linearmente restrita são caracterizados por restrições que se ajustam completamente à programação linear, de modo que as funções de restrição sejam lineares, porém a função objetivo seja não linear.
- c) Programação Quadrática: Problemas de programação quadrática novamente possuem restrições lineares, no entanto, agora a função objetivo deve ser quadrática. Portanto,, a única diferença entre um problema destes e um problema de programação linear é que alguns dos termos na função objetivo envolvem o quadrado de uma variável básica ou produto de duas variáveis.
- d) Programação Convexa: A programação convexa cobre ampla gama de problemas que, na verdade, engloba como casos especiais todos os tipos de precedentes quando a função objetivo é uma função côncava a ser maximizada. Supondo a forma de problema genérico, há duas hipóteses:
  - A função objetivo seja uma função côncava.
  - Cada função de restrição seja a função convexa.
- e) Programação Separável: A programação separável é um caso especial da programação convexa, em que a única hipótese adicional é que:
  - Todas as funções, função objetivo e funções de restrições, sejam separáveis.
- f) Programação Não Convexa: A programação não convexa engloba todos os problemas de programação não linear que não satisfazem as hipóteses da programação convexa.
- g) Programação Geométrica: Esse caso é aquele em que todos os coeficientes em cada função são estritamente positivos, de modo que as funções sejam polinômios positivos generalizados e a função objetivo é ser minimizada.
- h) Programação Fracionária: É quando a função objetivo se encontra na forma de uma fração, isto é, a razão de duas funções.

Segundo Lachtermacher (2009), os problemas de programação inteira são aqueles de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros. Esses problemas podem apresentar dois tipos básicos:

- a) Programação inteira total: todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro.
- b) Programação inteira mista: apenas uma parte das variáveis é do tipo inteira, enquanto as outras são do tipo real.

Hillier e Lieberman (2010) relatam que em muitos problemas práticos, as variáveis de decisão, na verdade, fazem sentido apenas se elas tiverem valores inteiro. Por exemplo, normalmente é necessário alocar pessoal, máquinas e veículos a atividades em quantidades inteiras. Se as exigências de valores inteiros forem a única maneira pela qual um

problema se afasta da formulação de programação não linear, então se trata de um problema de programação inteira (PI).

Para a solução de problemas de programação inteira, pode-se utilizar algoritmos genéricos e específicos. De acordo com Colin (2011), algoritmos genéricos foram criados para resolver qualquer problema que fosse formulado na forma padrão da programação inteira. Algoritmos específicos, em geral, são muito mais eficientes, pois se beneficiam de particularidades dos problemas para os quais foram criados. Os algoritmos genéricos podem ser classificados em três grandes grupos:

- a) Técnicas enumerativas: Como *Branch-and-Bound* (B&B);
- b) Técnicas de cortes: Como o algoritmo de planos de corte;
- c) Técnicas mistas: Usam enumeração e cortes ao mesmo tempo.

## 2.5 Algoritmos de resolução

### 2.5.1 Método do gradiente

Taha (2008) afirma que o método do gradiente é utilizado para otimizar funções que são duas vezes diferenciáveis continuamente. A ideia é gerar pontos sucessivos na direção do gradiente da função.

O término do método de gradiente ocorre no ponto em que o vetor gradiente torna-se nulo, sendo essa apenas uma condição necessária para a otimalidade. Vale ressaltar que, a otimalidade não pode ser verificada a menos que saiba com antecedência se  $f(x)$  é côncava ou convexa.

Supondo que  $f(x)$  seja maximizada. Sendo  $X_0$  o ponto inicial onde o procedimento começa e defina-se  $\nabla f(X_k)$  como o gradiente de  $f$  no ponto  $X_k$ . O objetivo é determinar um caminho particular  $p$  ao longo do qual  $\partial f / \partial p$  é maximizada em ponto dado. Esse resultado é conseguido se forem selecionados pontos sucessivos  $X_k$  e  $X_{k+1}$ , tais que:

$$X_{k+1} = X_k + r_k \nabla f(X_k)$$

Onde  $r_k$  é o tamanho ótimo do degrau em  $X_k$ .

O tamanho do degrau  $r_k$  é determinado de modo que o próximo ponto,  $X_{k+1}$ , resulta na maior melhoria em  $f$ . Isso equivale a determinar  $r = r_k$ , que maximiza a função:

$$h(r) = f[X_k + r_k \nabla f(X_k)]$$

Como  $h(r)$  é uma função de uma única variável, o método de busca direta pode ser utilizado para achar a solução ótima, mas somente se  $h(r)$  seja estritamente unimodal. O procedimento proposto termina quando dois pontos sucessivos de tentativa,  $X_k$  e  $X_{k+1}$ , são aproximadamente iguais. Isso equivale a ter  $r_k \nabla f(X_k) \approx 0$ . Como  $r_k \neq 0$ , a condição necessária  $\nabla f(X_k) = 0$  é satisfeita em  $X_k$ .

### 2.5.2 Gradiente reduzido generalizado

Para Ragsdale (2009), o procedimento do *Solver* para a resolução de problemas de programação não linear é chamado de algoritmo reduzido generalizado (GRG). Os algoritmos de PNL iniciam em qualquer região viável do problema de PNL. Chama-se de ponto de partida essa solução viável inicial. O algoritmo, então, tenta se deslocar de um ponto de partida em uma direção na região viável que faz com que o valor da função objetivo melhore. Realizando um movimento, chamado de tamanho de passo, na direção viável selecionada resulta em uma solução nova, melhor e viável para o problema. Em seguida, o algoritmo tenta identificar outra direção viável na qual se deve deslocar para se obter mais melhorias no valor da função objetivo. Existindo essa direção, o algoritmo determina um novo tamanho de passo e move-se nessa direção, no sentido de uma solução viável melhor. Continua-se esse processo até que o algoritmo alcance um ponto em que não haja direção viável na qual se deslocar e que resulte numa melhora na função objetivo. Quando não existir nenhuma possibilidade de melhoria o algoritmo termina.

O método de gradiente reduzido, para problemas de minimização com restrições lineares foi estendido para o problema geral de programação não linear, originando o método de gradiente reduzido generalizado (GRG). Com a mesma filosofia dos métodos de restrições ativas para problemas com restrições lineares, os métodos do tipo GRG buscam diminuir o valor da função objetivo mantendo factibilidade dos iterandos. A ideia básica é que um conjunto de restrições de igualdade não lineares é um sistema de equações onde, de maneira implícita, é possível colocarem algumas variáveis em função de outras. Assim, minimizar com esse conjunto de restrições passa a ser um problema irrestrito cujas variáveis são, justamente, as variáveis selecionadas como independentes. Quando há restrições de desigualdade procedimentos adequados para mudar de face devem ser introduzidos. (MARTÍNEZ; SANTOS, 1995, p. 195).

Os métodos de tipo GRG têm analogia computacional com o método Simplex para programação linear. Usando técnicas de fatoração de matrizes e de manipulação de

esparsidade similares às usadas no Simplex, foram desenvolvidos programas GRG extremamente eficientes do ponto de vista prático e, inclusive, com valor comercial.

Para Dantas et al. (2007), o algoritmo de gradiente reduzido generalizado pode tratar da solução de problemas de otimização não lineares nos quais a função objetivo podem ter não linearidades de qualquer forma, contanto que essa função seja diferenciável. O algoritmo trata de problemas gerais de otimização restrita da forma:

Minimizar  $Z(X)$

Sujeito a:

$$0 \leq g_i(X) \leq u_b(i), i = 1, m,$$

$$l_b(i) < X_i < u_b(i), i = m+1, m+n,$$

Onde  $X$  é um vetor de  $n$  variáveis. Assume-se que as funções  $Z$  e  $g_i$  são diferenciáveis.

De acordo com Lasdon et al. (1978 *apud* DANTAS et al., 2007), o problema é resolvido minimizando uma sequência de problemas reduzidos, nos quais a função objetivo reduzida  $f(x)$  possui um vetor  $x$  (um subconjunto de  $X$ ) de variáveis não básicas. O sistema itera utilizando uma pesquisa unidimensional por meio de uma variação do método de Newton.

Martínez e Santos (1995) afirmam que o funcionamento dos métodos do tipo GRG depende fortemente de sua implementação e a fama dos métodos se deve, provavelmente, ao aproveitamento da experiência Simplex para produzir bom software.

Ragsdale (2009, p. 353) afirma “algoritmos de PNL podem terminar em uma solução ótima local que pode não ser a solução ótima global do problema. A solução ótima local na qual um algoritmo de PNL termina depende do ponto de partida inicial”.

### **3 ESTUDO DE CASO**

Neste capítulo serão apresentadas as etapas da pesquisa para o desenvolvimento do método utilizado para o alcance do objetivo deste estudo, mencionados no capítulo introdutório.

#### **3.1 Etapas**

##### ***3.1.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa***

A descrição das características atuais da empresa será apresentada nesta etapa, como cenário atual, estrutura organizacional, capacidade produtiva, alcance de mercado, dentre outras informações necessárias para a caracterização da mesma.

##### ***3.1.2 Etapa 2 – Descrição do processo atual e coleta de dados***

Após a caracterização da empresa, é necessário descrever o processo atual em estudo. Os conceitos particulares usados na empresa serão expostos através de um comparativo com os conceitos apresentados na literatura, com o objetivo de facilitar a compreensão do leitor. Serão apresentados dados e informações relacionados ao arranjo físico, a lógica da sequência das operações, taxa de produção da linha atual, tempo ciclo atual, restrições impostas pela a empresa, equipamentos necessários e tempos de secagem.

##### ***3.1.3 Etapa 3 – Cálculo do balanceamento ótimo***

Compõe esta etapa o desenvolvimento do modelo de Programação Não Linear Inteira, descrevendo todas as restrições e fórmulas. Utiliza-se o software Microsoft Excel, por meio do suplemento *Solver*, como ferramenta para a obtenção das respostas.

##### ***3.1.4 Etapa 4 - Desenvolvimento do balanceamento ótimo e resultados***

Após a apresentação do cálculo do balanceamento ótimo descreve-se o desenvolvimento da implementação do algoritmo para o objeto de estudo. O balanceamento obtido, através do *solver*, acompanha a emissão do relatório de respostas, os relatórios de

limites e sensibilidade não são significativos para problemas com restrições de números inteiros.

### ***3.1.5 Etapa 5 – Projeto do layout***

Nessa etapa, após a implementação do modelo é possível desenhar o layout, posicionando e dimensionando os postos de trabalho dentro da linha de montagem, levando em consideração os resultados do modelo implementado e realocação de operações.

## **3.2 Desenvolvimentos do estudo de caso**

### ***3.2.1 Etapa 1 – Caracterização da Empresa***

O estudo em questão foi realizado em uma indústria calçadista localizada no Estado do Ceará. A empresa teve sua fundação no ano de 1971 e é uma das maiores produtoras mundiais de calçados, possuindo tecnologia proprietária e exclusiva na produção de calçados para os públicos feminino, masculino e infantil.

A empresa é totalmente integrada, com capacidade instalada em suas seis unidades industriais, compostas por 12 fábricas de calçados e, aproximadamente, 24.000 funcionários, com capacidade instalada total de 200 milhões de pares/ano, além de matrizaria e fábrica de PVC para consumo próprio na produção de calçados; com uma logística de distribuição que atinge desde distribuidores a varejistas tradicionais e não tradicionais em todo o território nacional e no exterior.

Desde 2003, é o maior exportador de calçados do Brasil em volume de pares e está presente em cerca de 50 mil pontos de venda no exterior. São desenvolvidas ações nas áreas de operação, logística, produto e comercial dedicado exclusivamente ao comércio exterior, ocupando posição de vanguarda na implantação de sistemas de informatização e integração com os órgãos de comércio exterior brasileiro.

No cenário atual, a empresa tem uma perspectiva de grande crescimento, necessitando de constantes ações de melhorias relacionado à sua capacidade produtiva, portanto o presente estudo torna-se uma ferramenta de suma importância para o alcance deste crescimento.

### 3.2.2 Etapa 2 – Descrição atual do processo e coleta de dados

Antes de descrever o processo, é necessário identificar o uso de nomenclaturas que são usadas na empresa e diferem dos conceitos apresentados na literatura. O Quadro 2 descreve os conceitos de cada termo utilizados no ambiente da empresa e que diferem do usual. Vale ressaltar que a apresentação dos termos de tempo ciclo e *takt time*, a partir deste ponto, terá o sentido conforme utilizado na empresa.

Quadro 2 – Comparativo dos conceitos

	Tempo ciclo	Takt time
<b>Conceito usual</b>	Tempo de execução da operação, ou das operações, na máquina/posto mais lento; em outras palavras, é o ritmo máximo possível, mantidas as condições atuais. (ALVAREZ; ANTUNES JR., 2001, p. 8)	Ritmo de produção necessário para atender a um determinado nível considerado de demanda, dadas as restrições de capacidade da linha ou célula. (Alvarez e Antunes Jr., 2001)
<b>Fórmula usual</b>	$TC = \left( \frac{\text{Tempo disponível por período}}{\text{Capacidade produtiva do gargalo}} \right)$	$Takt\ time = \left( \frac{\text{Tempo disponível por período}}{\text{Demanda diária por período}} \right)$
<b>Conceito utilizado</b>	Tempo total, em minutos, gasto por um operador para a produção de 01 par.	Tempo necessário para produzir um componente ou um produto completo, baseado no padrão de produção/hora pré-estabelecido.
<b>Fórmula utilizada</b>	$TC = \left( \frac{60}{\text{Padrão - hora}} \right) \times MO_{total}$	$Takt\ time = \left( \frac{3.600}{\text{Padrão - hora}} \right)$

Fonte: Autoria própria.

O estudo apresenta o balanceamento da linha de montagem com o objetivo de minimizar o tempo ciclo. Para o estudo utilizou-se a linha de montagem de um modelo de sandália do tipo rasteira. Este tipo de sandália apresenta um alto volume no quadrimestre e tem uma estrutura de média complexidade, sendo satisfatório o seu uso como objeto de estudo. No Quadro 3, lista-se as peças que compõem o produto:

Quadro 3 – Componentes da sandália

Componentes
Cabedal
Palmilha
Soleta
Enfeite “M”
Enfeite ABS
Enfeite ABS inferior

Fonte: Autoria própria.

A linha apresenta um *takt time* de 27,27 segundos por produto e um tempo de ciclo de 10,45 minutos, utilizando 23 operadores. A eficiência da mão de obra total está em 85,2%. A eficiência da mão de obra é calculada da seguinte forma:



$$Eficiência\ MO = \frac{(\sum_{n=1}^{19} MON_n)}{(\sum_{n=1}^{19} MO_n)}$$

É necessário destacar que esta linha está com o seu processo estabilizado, pois as ações de melhorias só poderão ser realizadas após as definições do processo estarem conforme.

O arranjo físico atual é considerado como arranjo físico por produto, onde os postos de trabalhos estão dispostos conforme a sequência de montagem do produto, levando em consideração as dependências de tarefas. O produto segue um roteiro predefinido que coincide com a sequência na qual os processos foram arranjados fisicamente.

Atualmente para este produto a linha de montagem está configurada para dezenove operações. A empresa atua com um processo de revisão de seus produtos em todas as linhas de produção, esta revisão é feita para a garantia da qualidade dos seus produtos, portanto, existe uma vigésima operação. Como esta operação é uma tratativa especial, no estudo esta operação não será levada em consideração para o cálculo das restrições de mão de obra, mas somente para o cálculo das restrições do espaço utilizado.

Nesta linha de montagem o fluxo do material obedece a restrições de precedência, ou seja, existem operações que dependem de outras para serem realizadas. A definição das relações de precedência deve ser analisada de forma detalhada, pois esta relação será de suma importância para o projeto do arranjo físico. Estas relações estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Relação de precedência

Operação	Descrição	Precedências
10	Limpar área de colagem da palmilha + Área de colagem da soleta	
20	Limpar soleta na área de montagem com o cabedal	
30	Aplicar cola no cabedal - área de montagem da palmilha	10
40	Aplicar cola no cabedal - área de montagem da soleta	20
50	Aplicar 1° e 2° d'mão de cola na palmilha + Aplicar 1° d'mão de cola na soleta	
60	Montar palmilha no cabedal	30, 40 e 50
70	Embutir fôrma + Montar soleta + Prensar colagens Limpar área externa do cabedal	60
80	Limpar área externa do cabedal	70
90	Preparar cabedal com primer	80
100	Aplicar verniz no cabedal	90
110	Retirar gabarito e abastecer da esteira inferior + Montar enfeite "M" + Rebitar	100
120	Retirar enfeite de ABS inferior da embalagem + Encaixar enfeite no cabedal	110
130	Rebitar enfeite cabedal	120
140	Retirar enfeite de ABS inferior da embalagem + Encaixar enfeite no cabedal	130
150	Rebitar enfeite cabedal	140
160	Revisar rebitagem dos enfeites ABS + Enfeite "M"	150
170	Amassar papel bucha + Inserir papel bucha na sandália	160
180	Colocar papel filme na sandália	170
190	Revisar + Acondicionar	180

Fonte: Autoria própria.

No Quadro 5, apresenta-se a capacidade produtiva, a mão de obra real e necessária para cada operação, conforme processo atual. O valor da mão de obra necessária é calculado da seguinte forma:

$$MON_n = \frac{P}{PH_n}$$

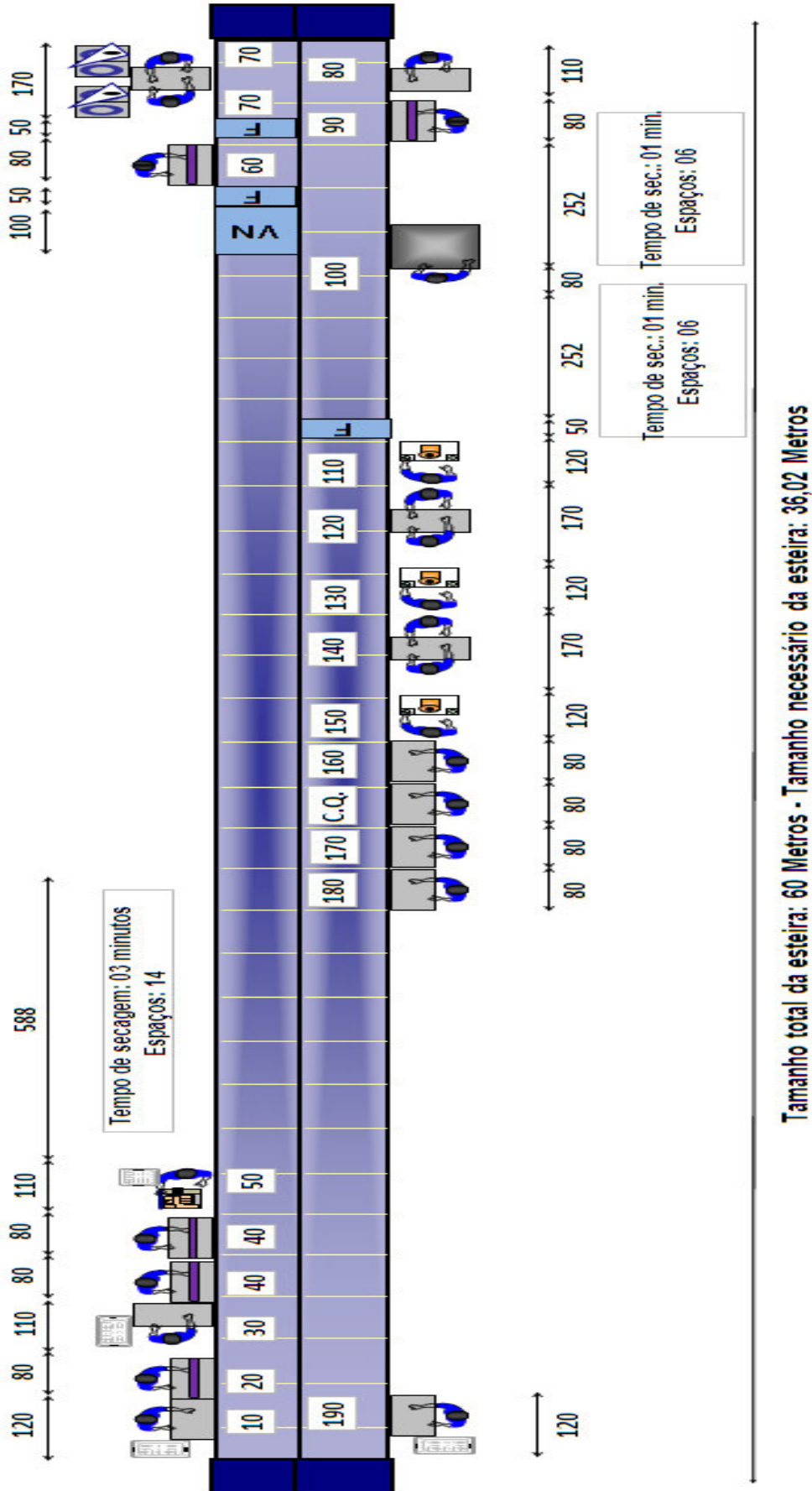
Quadro 5 – Exemplo da disposição da função objetivo e variáveis de decisão

Operação	Padrão Cronoanálise (pares/hora)	M.O. Real	M.O. Nec.
10	167	1	0,79
20	166	1	0,80
30	138	1	0,96
40	79	2	1,67
50	191	1	0,69
60	145	1	0,91
70	66	2	2,00
80	140	1	0,94
90	141	1	0,94
100	132	1	1,00
110	152	1	0,87
120	67	2	1,97
130	263	1	0,50
140	67	2	1,97
150	263	1	0,50
160	260	1	0,51
170	138	1	0,96
180	134	1	0,99
190	205	1	0,64
C.Q.	233	1	0,57

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a configuração atual, pode-se identificar as operações 70 e 100 como o gargalo da linha, pois o seu padrão cronoanálise define o padrão-hora do produto, sendo a capacidade produtiva destas operações iguais ao padrão-hora do modelo. Nas operações 10, 20 e 50 inicia-se, simultaneamente, o fluxo do material, pois estas não tem nenhuma relação de precedência. As operações 10 e 20 consistem na limpeza do cabedal e do componente soleta, respectivamente, já a operação 50 consiste na aplicação de cola na palmilha e soleta, o qual a palmilha tem necessidade de aplicar cola duas vezes, este processo consiste em uma primeira aplicação de cola e o seu abastecimento na esteira inferior e uma segunda aplicação de cola e o seu abastecimento na esteira superior. Após a realização das operações anteriores realizam-se as operações 30 e 40, sendo estes postos responsáveis pela aplicação de cola no cabedal na área de colagem da palmilha e na área de colagem da soleta, respectivamente. A Figura 9 ilustra o layout atual da linha de montagem do produto em estudo:

Figura 9 – Layout atual da linha de montagem (distâncias em centímetros)



Fonte: Engenharia de processos da empresa.

Após as aplicações de cola nos componentes e no cabedal é necessário um espaço para que aja um tempo de secagem, conforme definido no layout. Em seguida, na operação 60 há a montagem da palmilha com o cabedal. Na operação 70 há a montagem do componente soleta e a prensagem de todos os componentes com o cabedal. Há outra operação de limpeza, a operação 80, a qual é realizada para a preparação do cabedal, operação 90, onde na operação 100 será realizada a pintura do produto. Vale ressaltar que após a preparação e a pintura do cabedal é necessário um minuto de secagem após cada operação.

Com a finalização da pintura do cabedal é iniciado a operação 110, que consiste na montagem e rebitagem do enfeite “M”. Há a montagem do enfeite ABS na operação 120 e sua rebitagem na operação 130. Em seguida, ocorre a montagem do enfeite ABS inferior e sua rebitagem nas operações 140 e 150, respectivamente. Na operação 160 o operador revisa as rebitagens de todos os enfeites. Na finalização da montagem há as operações de inclusão de material para a proteção do produto, na operação 170 ocorre à inserção do papel bucha e na operação 180 do filme plástico. No final da linha na operação 190 ocorre a última revisão e o acondicionamento do produto em caixas plásticas. Como já falado anteriormente, a operação indicada no layout como “C.Q.” é a operação a qual é apenas contabilizada como espaço utilizado, esta operação consiste na revisão do produto pelo setor de qualidade.

Os dados e informações necessárias para o desenvolvimento do estudo foram coletados por meios de relatórios emitidos pelo sistema, pela vivência na linha produtiva e pelo compartilhamento de experiência dos colaboradores do setor de engenharia que atuam no setor de montagem.

Primeiramente, através do setor de engenharia de processo da empresa, coletaram-se informações sobre quais operações o modelo de sandália em estudo contém, a capacidade produtiva de cada operação, o aproveitamento da mão de obra para cada operação e as relações de precedências. Estes dados foram necessários para a montagem da base do modelo matemático e usado como comparativo para medição da melhoria alcançada.

Após a coleta dos dados, buscou-se, através da vivência no setor, compreender a sequência dos postos, as definições de processos e ter uma confirmação sobre a veracidade dos tempos cadastrados atualmente, os quais foram obtidos pela cronoanálise. A troca de experiências com os colaboradores, do setor de engenharia de processos que atuam na linha de montagem, e a consulta ao documento de normas técnicas de produção, proporcionou o conhecimento dos parâmetros que garantem a qualidade, como por exemplo, a necessidade da existência do tempo de secagem, equipamentos que podem ser utilizados para forçar essa

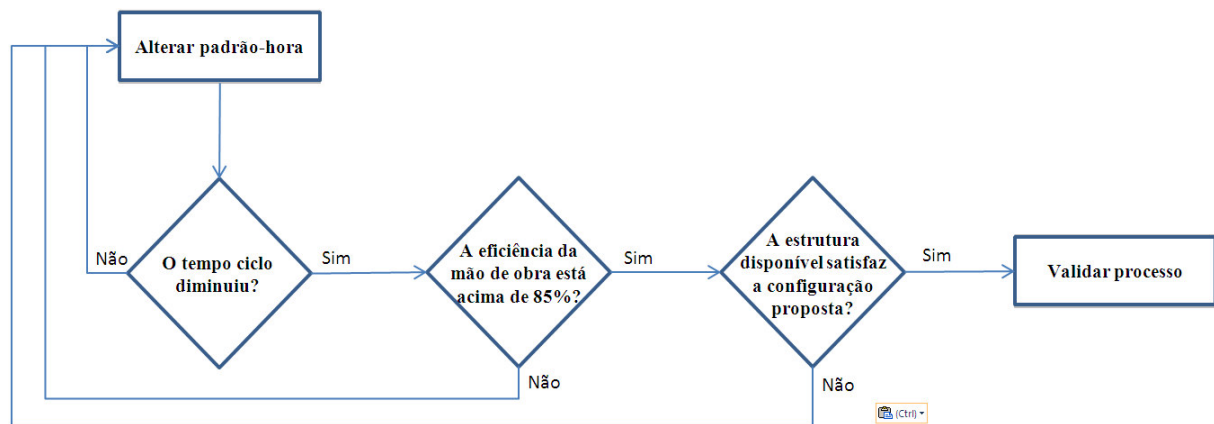
secagem e as temperaturas que os componentes devem atingir. Estes parâmetros foram criados, em acordo entre o responsável da engenharia e o responsável da qualidade.

Para o projeto do layout foi utilizado o layout atual como base, o qual foi desenvolvido e fornecido pelos analistas do setor de engenharia de processos. A percepção adquirida através da vivência na linha de montagem e a troca de experiências proporcionou o reconhecimento de não conformidades em relação aos parâmetros impostos para a qualidade do produto, estas falhas foram corrigidas no projeto do layout.

### 3.2.3 Etapa 3 – Cálculo do balanceamento ótimo

Diante do conceito de melhoria contínua estabelecida na empresa e da crescente demanda do mercado, os responsáveis pelo cálculo do balanceamento da linha de montagem, os analistas de processos, devem propor melhorias para a linha. Estas propostas são baseadas no método de tentativa e erro. A Figura 10 apresenta a metodologia atual, a qual é realizada por meio de uma planilha eletrônica, facilitando os cálculos:

Figura 10 – Metodologia utilizada pelos analistas de processos



Fonte: Autoria própria.

Há outra justificativa para o cálculo do balanceamento, de acordo com Gaither e Frazier (2002), mudanças na demanda por produto, modificações de máquinas, variações no aprendizado e treinamento de empregados e outras mudanças podem levar às linhas de produção desbalanceadas ou com capacidade insuficiente ou excessiva. Em todos estes casos, as linhas de montagem devem ser rebalanceadas.

Este método diante dos recursos da pesquisa operacional se torna ineficiente. Portanto, o estudo em questão propôs um novo método, utilizando um modelo de

Programação Não Linear Inteira, através do algoritmo de gradiente reduzido. O uso deste algoritmo proporcionou o balanceamento ótimo.

Para calcular a solução ótima do problema em estudo, utilizou-se planilha de *Excel* e o suplemento *Solver*. O *Solver* faz parte de um conjunto de programas, que geralmente são chamados de ferramentas de análise hipotética, ou seja, uma ferramenta que possibilita encontrar um valor ideal para uma determinada equação. O mesmo utiliza-se do algoritmo Gradiente reduzido generalizado para obter a solução ótima e foi desenvolvido por Leon Lasdon, da universidade do Texas em Austin e Allan Waren, da Cleveland State University.

O indicador usado para medir o impacto da melhoria sobre a linha de montagem é a redução do tempo de ciclo. O tempo de ciclo é afetado por vinte variáveis, sendo a variável  $MO_{total}$  apenas a soma de cada variável da mão de obra real das 19 operações:

$P$  – Quantidade de pares produzidos em uma hora na linha de montagem;

$MO_{total}$  – Quantidade de mão de obra direta presente na linha de montagem.

O modelo tem como base para identificação das restrições algumas características relacionadas à metodologia da empresa e limitações físicas, descritas a seguir:

- a) O aproveitamento da mão de obra deverá ser acima de 85%.
- b) A esteira de montagem com duas lonas têm uma extensão disponível de 30 metros, quando usado duas lonas é contabilizado um espaço disponível de 60 metros.

A seguir serão descritas o restante das variáveis e as restrições utilizadas com suas formulações matemáticas:

$MO_n$  – Número real de operadores alocados para a operação  $n$ ;

$MON_n$  – Número necessário de operadores para a operação  $n$ ;

$PH_n$  – Padrão/hora estabelecido pela cronoanálise para a operação  $n$ ;

$MP_n$  – Espaço utilizado pelo posto de trabalho em metros para a operação  $n$ ;

$ME_n$  – Espaço utilizado por equipamentos em metros para a operação  $n$ ;

$MS_n$  – Espaço necessário para secagem do componente em metros para a operação  $n$ .

Restrições associada à mão de obra: garante que seja definido uma quantidade inteira de operadores para a operação  $n$  e que no mínimo para cada operação aja um operador,

respeitando a meta, estabelecida pela a empresa, de aproveitamento de 85% da mão de obra total.

$$MO_{10}; MO_{20}; \dots; MO_n \in Z$$

$$MO_{10}; MO_{20}; \dots; MO_n \geq 1$$

$$MON_{total} \geq 85\% \times MO_{total}$$

Restrição associada ao gargalo: as operações devem satisfazer o padrão/hora da linha, sendo a operação que satisfazer esta restrição com o resultado zero será a operação gargalo.

$$[PH_n \times MO_n] - P \geq 0 \quad \forall n$$

Restrições de espaço: são restrições que impedem uma alocação total dos postos de trabalho que excedam a capacidade da esteira, que é de sessenta metros.

$$\sum_{i=1}^{20} (MP + ME + MS)_n \leq 60$$

Função Objetivo: para esse caso, a função objetivo é minimizar o tempo ciclo da linha de montagem.

$$TC = (60/P) \times MO_{total}$$

Portanto, o modelo matemático foi representado da seguinte forma:

$$\min TC = (60/P) \times MO_{real\ total}$$

Sujeito a:

$$MO_{10}; MO_{20}; \dots; MO_n \in Z$$

$$MO_{10}; MO_{20}; \dots; MO_n \geq 1$$

$$MON_{total} \geq 85\% \times MO_{total}$$

$$[PH_n \times MO_n] - P \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^{20} (MP + ME + MS)_n \leq 60$$

As formulações matemáticas da função objetivo e das restrições foram colocada na planilha do Excel, para, posteriormente, através da ferramenta *Solver*, serem solucionadas. Apresenta-se, no Quadro 6, exemplo da disposição das operações, pré-estabelecidas, e suas respectivas capacidades na coluna “Padrão H”.

Quadro 6 – Exemplo da disposição das restrições de mão de obra

Operação	Padrão H.	M.O. real	Restrição	LD1	M.O. Nec.	LE	Restrição	LD2
10	167	2	>=	1	1,6	74	>=	0
20	166	2	>=	1	1,6	72	>=	0
30	138	2	>=	1	1,9	16	>=	0
40	79	4	>=	1	3,3	56	>=	0
50	191	2	>=	1	1,4	122	>=	0
60	145	2	>=	1	1,8	30	>=	0
70	66	4	>=	1	3,9	4	>=	0
80	140	2	>=	1	1,9	20	>=	0
90	141	2	>=	1	1,8	22	>=	0
100	132	2	>=	1	2,0	4	>=	0
110	152	2	>=	1	1,7	44	>=	0
120	67	4	>=	1	3,9	8	>=	0
130	263	1	>=	1	1,0	3	>=	0
140	67	4	>=	1	3,9	8	>=	0
150	263	1	>=	1	1,0	3	>=	0
160	260	1	>=	1	1,0	0	>=	0
170	138	2	>=	1	1,9	16	>=	0
180	134	2	>=	1	1,9	8	>=	0
190	205	2	>=	1	1,3	150	>=	0
C.Q.	233	2	>=	1	1,1	206	>=	0

Fonte: Autoria própria.

O quadro anterior apresenta as restrições da mão de obra, onde a coluna “LD1” representa o valor mínimo de operadores que devem existir para cada operação. Em seguida, as restrições do gargalo são dispostas e reconhecidas por meio da coluna “LD2” em comparativo com a coluna LE, sendo os valores da coluna LE a folga que a operação apresenta entre a sua capacidade e a demanda da linha.

As restrições dispostas no Quadro 7 referem-se à utilização da estrutura. A linha de montagem limita-se a um espaço de 60 metros, portanto, o modelo define que a soma total dos espaços utilizados pelos postos, equipamentos e para a secagem dos componentes devem ser alocadas na estrutura disponível e devem ter um valor inferior a 60 metros para que a qualidade e a eficácia da produção sejam alcançadas.

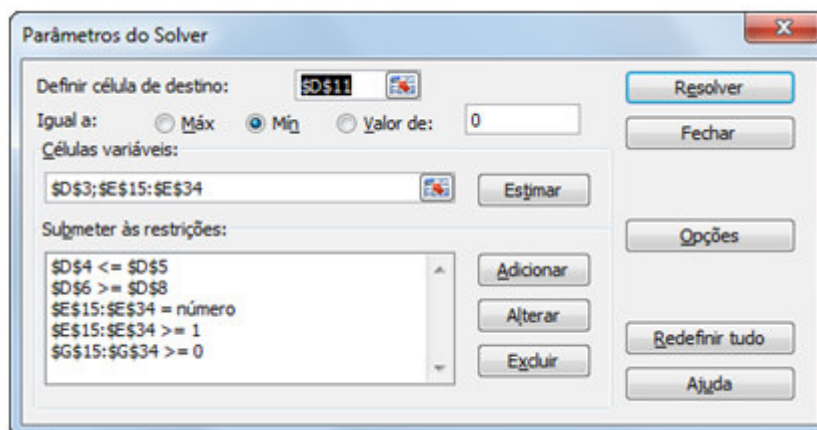


Quadro 7 – Exemplo da disposição da restrição do espaço

Operação	Posto de trabalho	Metragem do posto	Equip.	Metragem do Equip.	Tempo de secagem (seg.)	Metragem do tempo de secagem
10	Bancada + Caixa plástica	2,40				0,0
20	Bancada + Caixa plástica	2,40				0,0
30	Bancada Frente	1,60				0,0
40	Bancada Frente	3,20				0,0
50	Coleiro	2,20	VN	1,00	180	5,85
60	Bancada Frente	1,60	Flash	1,00		0,0
70	Sorveteira a vácuo	4,40	Flash	2,00		0,0
80	Bancada Frente	1,60				0,0
90	Bancada Frente	1,60			60	1,15
100	Cabine de verniz	3,20	Flash	0,50	60	1,95
110	Rebitadeira	2,40				0,0
120	Bancada Frente	3,20				0,0
130	Rebitadeira	1,20				0,0
140	Bancada Frente	3,20				0,0
150	Rebitadeira	1,20				0,0
160	Bancada Frente	0,80				0,0
170	Bancada + Caixa plástica	2,40				0,0
180	Bancada Frente	1,60				0,0
190	Bancada + Caixa plástica	2,40				0,0
C.Q.	Bancada Frente	1,60				0,0
<b>Total</b>		<b>44,20</b>		<b>4,50</b>		<b>8,95</b>
<b>Restrição do espaço utilizado</b>						
Total do Posto		44,20				
Total do Equip.		4,50				
Total do tempo de sec.		8,95				
<b>Soma</b>		<b>57,65</b>	<b>≤</b>		<b>60</b>	

Fonte: Autoria própria.

Após a criação da planilha é necessário interligar as células, definindo os cálculos de restrições de mão de obra, metragem utilizada e a função objetivo. Em seguida, são indicados os parâmetros do *solver*: célula de destino (função objetivo), células variáveis (variáveis de decisão) e restrições. Na Figura 11, ilustra-se a interface da ferramenta utilizada:

Figura 11 – Tela do *Solver* para inserir informações do modelo

Fonte: Imagem do *Solver*.

### 3.2.4 Etapa 4 – Desenvolvimento do balanceamento ótimo e resultados

Com a utilização da planilha eletrônica, já apresentada anteriormente, calculou-se o balanceamento ótimo para a linha de montagem em estudo. Para alcançar os resultados teve-se que fazer o preenchimento da planilha conforme especificações já estabelecidas e novas especificações que tem como objetivos melhorar a qualidade do produto, a ergonomia do operador e a simplificação do cálculo do balanceamento, dentre estas novas especificações tem-se:

- a) Padronização de postos individuais;
- b) Padronização de postos frontais, quando não se utilizam máquinas;
- c) Inclusão de tempo de secagem nas operações de limpeza.

Inicialmente, foram cadastrados todos os postos de trabalho para cada operação, conforme necessidade, identificando o espaço utilizado por cada posto. Em seguida, incluíram-se os equipamentos de secagem, para isso foram identificados os equipamentos que variam de acordo com a quantidade de postos da operação e os que independem desta quantidade. O Quadro 8 apresenta os postos que têm estes equipamentos que dependem, ou não, da quantidade de postos da operação:

Quadro 8 – Relação de dependência entre postos de trabalho e equipamentos de secagem

<b>Equipamentos</b>	<b>Operações Dependentes</b>	<b>Operações Independentes</b>
Vento Norte	-	Op. 50
Flash	Op. 60 e Op. 70	Op. 100

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foram inseridos os tempos de secagem para as operações de limpeza, aplicação de cola, preparação e pintura. Para as operações de limpeza é necessário um tempo de 60 segundos, para aplicação de cola 180 segundos, para a preparação 60 segundo e para a pintura 60 segundos. Na metragem utilizada para a secagem após a operação de preparação subtrai-se 0,80 m devido à posição da cabine da operação posterior, a operação de pintura, o espaço ocupado pela cabine ocupa o mesmo espaço utilizado para a secagem, portanto, é necessário fazer esta subtração.

Após todas estas informações serem inseridas na planilha foi utilizado a ferramenta *Solver*, que através do algoritmo do gradiente reduzido generalizado gerou os seguintes resultados da mão de obra real, mão de obra necessária, padrão-hora, eficiência da mão de obra e o menor tempo ciclo possível, conforme resumo na Tabela 1.

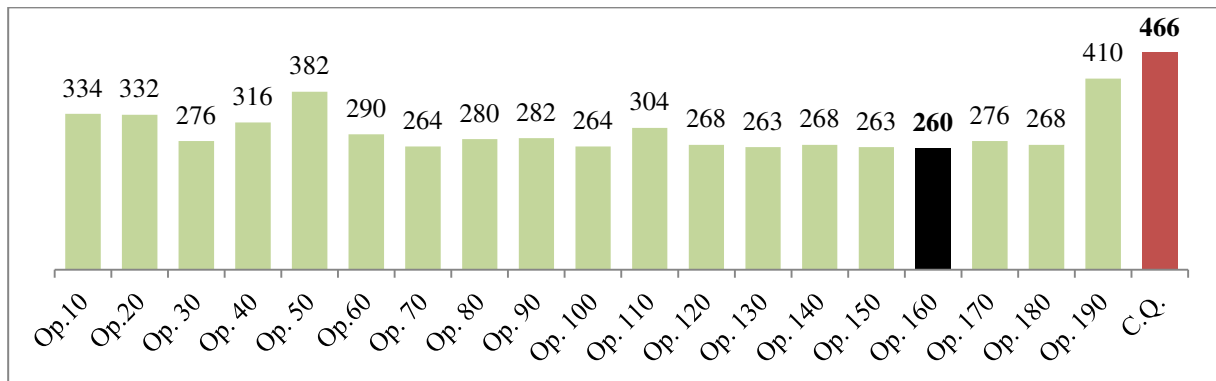
Tabela 1 – Resumo dos resultados

Padrão (Pares/h)	Metragem utilizada (m)	Metragem disponível (m)	M.O. Necessária Total	M.O. Real Total	Eficiência	Tempo ciclo proposto (min.)
260	57,65	60	38,6	43	89,80%	9,92

Fonte: Autoria própria.

O cálculo do balanceamento ótimo proporcionou os resultados da quantidade de mão de obra para cada operação, podendo assim verificar a capacidade produtiva que cada operação poderá realizar. No Gráfico 1, apresenta-se, para cada operação, o seu padrão-hora, tendo como base o padrão-hora da linha e o tempo de ciclo da operação obtido por meio da cronoanálise:

Gráfico 1 – Capacidade produtiva (pares/hora)



Fonte: Autoria própria.

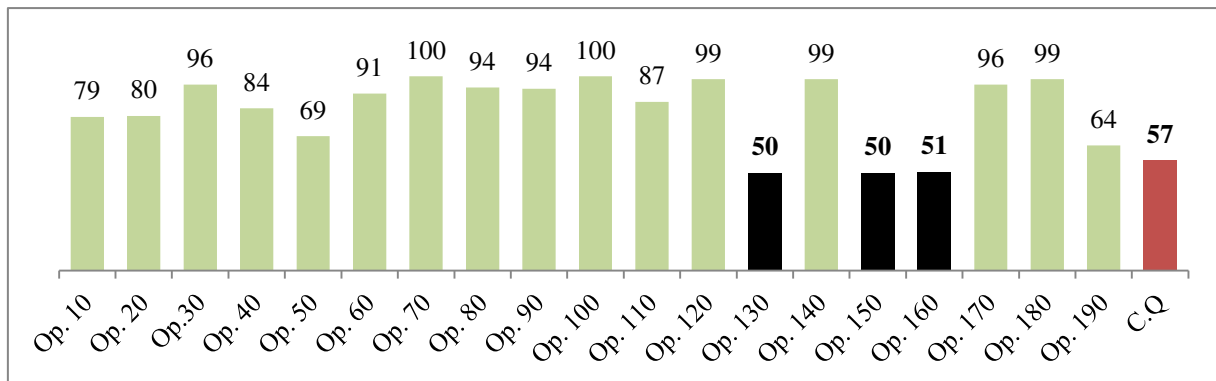
Ao analisar o gráfico anterior, percebe-se que todas as operações satisfazem o padrão-hora proposto de 260 pares. A utilização da ferramenta *Solver* disponibiliza a emissão um relatório de respostas. Neste relatório é dada informação sobre a solução ótima (células ajustáveis) e o valor ótimo da função objetivo (Célula de destino), ver apêndice.

No que diz respeito às restrições, é de salientar a informação sobre a distância a que, na solução ótima, está do limite desta restrição. Com relações aos padrões, a operação 10 é constituída por dois operadores cada um podendo produzir 167 pares/hora, ao todo a operação pode produzir 334 pares/hora. No entanto, a linha de montagem foi configurada para um padrão de produção de 260 pares/hora, conforme descrito anteriormente, o que dá uma folga de 74. Isso significa que esta restrição não está ativa. O mesmo não se pode dizer da restrição correspondente à operação 160, a qual apresenta uma folga de 0, ou seja, a capacidade produtiva da operação é igual ao padrão de produção da linha de montagem, sendo esta situação que caracteriza a operação como o gargalo da linha. O fato das restrições

apresentarem um status de inativo significa que as quantidades associadas a essas restrições estão acima daquilo que era exigido.

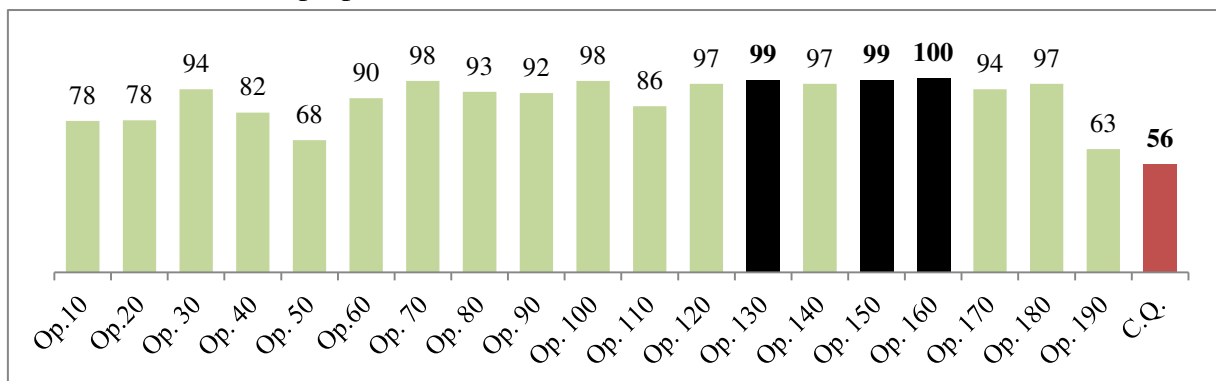
Da mesma forma que o cálculo do balanceamento proporcionou um ótimo resultado relacionado a restrições do gargalo, para a restrição da mão de obra obteve-se um aumento considerável no aproveitamento total da linha. Em um número considerável de postos o aproveitamento elevou-se e outros se mantiveram dentro de uma variação de  $\pm 1\%$ . Nos Gráficos 2 e 3, observa-se um comparativo entre o aproveitamento da mão de obra para cada operação no balanceamento atual e no balanceamento proposto neste estudo.

Gráfico 2 – Eficiência atual (%)



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 3 – Eficiência proposta (%)



Fonte: Autoria própria.

Em uma análise do comparativo dos gráficos anteriores, pode-se verificar que o motivo para a eficiência da linha de montagem, deve-se à elevação da eficiência das operações 130, 150 e 160, as quais estavam em uma situação crítica com um aproveitamento em média de 50%. Após o balanceamento ótimo suas eficiências obtiveram um acréscimo, alcançando um valor em média de 99%.

Diante dos resultados, pode-se criar um plano para implantação desta estrutura no processo produtivo. As mudanças muitas vezes podem gerar desconforto nos colaboradores, portanto, o uso deste balanceamento será feito progressivamente. Ou seja, a linha de montagem produzirá conforme balanceamento proposto, mas em caráter de análise, para, posteriormente, se for aprovada pelos supervisores dos setores de produção, engenharia e qualidade ser validada.

### ***3.2.5 Etapa 5 – Projeto do layout***

O arranjo físico para o balanceamento ótimo é proposto nesta etapa. O desenho do arranjo físico atual, conforme Figura 9, foi utilizado como base para o projeto proposto, para evitar grandes alterações estruturais e facilitar a sua aplicação e aceitação. Além do arranjo físico atual foram utilizados os resultados do balanceamento ótimo como recurso para o projeto proposto.

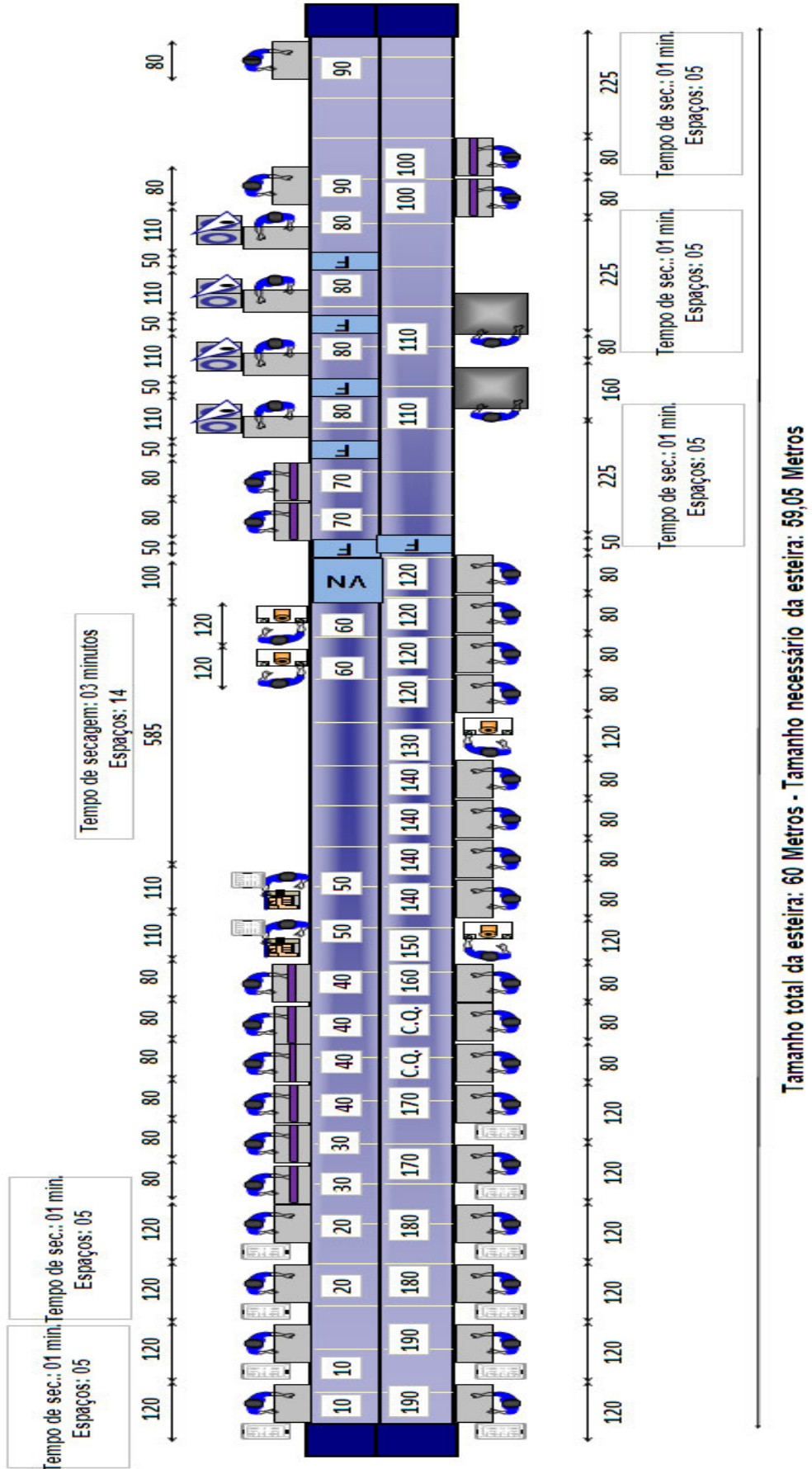
Foi necessária a realização de algumas adequações, no balanceamento ótimo, como por exemplo, a padronização dos postos de trabalhos individuais, diferenciando as dimensões que atualmente são usadas. Esta padronização foi realizada diante de duas propostas de melhoria, primeiramente, com o objetivo de melhorar a ergonomia do operador, através da troca de bancadas laterais para bancadas frontais, e para simplificar o cálculo da metragem utilizada.

Ocorreu uma diferenciação de 1,40 m entre os resultados da utilização da esteira do balanceamento ótimo e a construção do layout real, esta divergência se deu pela preocupação de realizar alterações para garantir uma melhor qualidade do produto, para isso foram feitas as seguintes alterações: arredondamento para cima dos espaços utilizados para as secagens das operações 90 e 100; alocação da operação 110 para após a operação 50, aproveitando, portanto, o espaço de secagem; e inclusão de tempos de secagem após a operação 80, para uma garantia da qualidade do processo.

Vale ressaltar que o primeiro posto da operação 10 e o último posto da operação 190 devido a sua localização nas extremidades da esteira foram possíveis excluir a metragem ocupada pelas caixas plásticas, pois estas estão fora da esteira, assim estes dois postos foram contabilizados como tendo uma medição de 0,80 m.

Na Figura 12, apresenta-se o layout proposto com as operações dispostas em uma nova ordem, conforme mudanças citadas anteriormente e levando em consideração os resultados da otimização do balanceamento.

Figura 12 – Layout proposto da linha de montagem (distâncias em centímetros)



Fonte: Engenharia de processos da empresa.

### 3.3 Considerações finais do estudo de caso

Através do indicador de redução do tempo de ciclo, pode-se identificar a eficácia do uso da Programação Não Linear Inteira (PNLI) para o balanceamento da Linha de montagem. O tempo ciclo proposto de 9,92 teve redução de 5,04%, quando comparado ao tempo ciclo atual que é de 10,45. Causando um impacto positivo na produtividade, já que com este resultado a quantidade de horas trabalhadas para uma mesma demanda será menor quando comparada com o balanceamento atual.

Um dos fatores que influenciaram a minimização do tempo ciclo foi o aumento do padrão-hora do modelo, comparando-se o padrão-hora atual com o proposto pelo modelo pode-se perceber um aumento de 96,96%, comprovando o aumento da produtividade da linha em estudo.

Pode-se, também, identificar a eficácia do uso da PNLII através do aumento do aproveitamento da mão de obra. Através do balanceamento ótimo obteve-se redução de 14,8% de ociosidade para 10,2%, obtendo-se um decréscimo em uma proporção de 31%. A eficiência da mão de obra teve um aumento de 5%, pois a eficiência atual que é de 85,2% elevou-se para 89,8% no balanceamento proposto.

Outro ganho considerável foi a de utilização da linha, no balanceamento atual o aproveitamento da estrutura está em 60,03% ocupando um espaço de 36,02 m, no balanceamento proposto o aproveitamento é de 98,41% com uma utilização de 59,05 m. O aumento do aproveitamento foi de 39,00%.

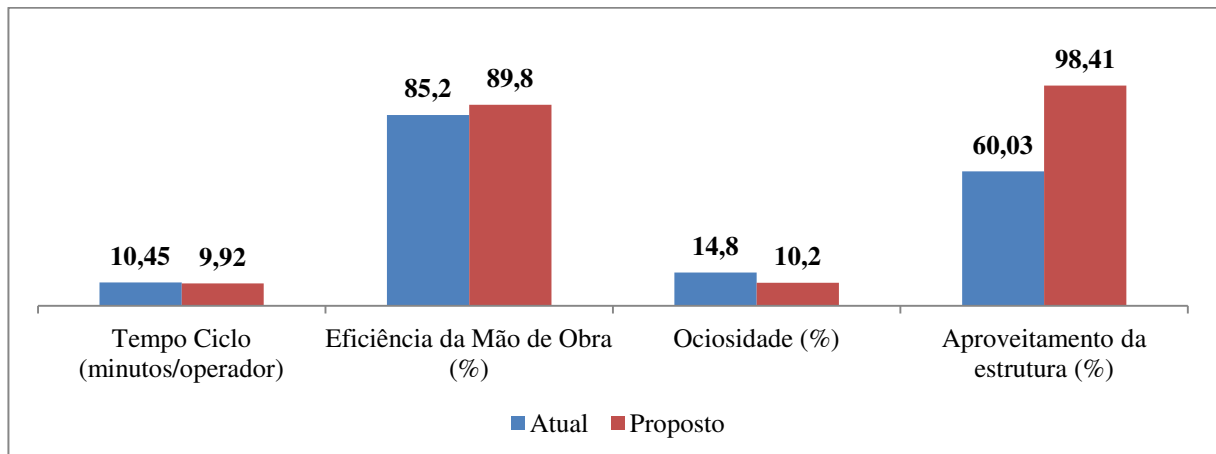
Portanto, o uso da Programação Não Linear Inteira foi extremamente eficaz, pois elevou quatro indicadores em proporções consideráveis, conforme a Tabela 2 e o Gráfico 4:

Tabela 2 – Comparativo entre o modelo proposto e o atual

<b>Indicadores</b>	<b>Atual</b>	<b>Proposto</b>	<b>Varição</b>
Tempo Ciclo (minutos/operador)	10,45	9,92	-5%
Eficiência da Mão de Obra (%)	85,2	89,8	5%
Ociosidade (%)	14,8	10,2	-31%
Aproveitamento da estrutura (%)	60,03	98,41	64%

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4 – Situação atual x Situação proposta



Fonte: Autoria própria.

Finalmente, podem-se avaliar os resultados como satisfatório, podendo, portanto, utilizar os dados emitidos pelo modelo, de forma integral ou quando não possível como base, para a tomada de decisões quanto a melhorias nas linhas de montagem.



## 4 CONCLUSÃO

O presente estudo teve por objetivo geral desenvolver um modelo de otimização para auxiliar no balanceamento de uma linha de montagem, respeitando as restrições de espaço e eficiência da mão de obra, em uma empresa calçadista.

A construção do modelo de programação não linear foi o meio para o alcance da solução ótima referente ao balanceamento da linha. Através da programação não linear inteira obteve-se a minimização do tempo ciclo da linha em estudo. Consequentemente, o *takt time* e o dimensionamento da mão de obra necessária e real, para cada operação, puderam ser definidos.

Os resultados apresentados pelo modelo de otimização proposto foram utilizados como base para o projeto do arranjo físico, definindo como serão dispostas cada operação na esteira. O projeto proposto teve algumas alterações, quando comparada aos resultados do modelo, devido à necessidade de adequar a linha para o aprimoramento da qualidade do produto.

Diante dos pressupostos e problema levantados, percebe-se que a programação não linear inteira apresenta-se como uma eficiente ferramenta para o balanceamento da linha de montagem na empresa calçadista. O desenvolvimento do processo de construção do modelo de otimização nesta empresa levou a um resultado satisfatório, apresentando o menor tempo ciclo possível, bem como diminuindo a resistência dos colaboradores às mudanças quanto ao método de balanceamento, em virtude dos bons resultados que o mesmo pode proporcionar à empresa. Nota-se ainda que, o processo de construção do modelo, permitiu aos um melhor aproveitamento da estrutura (esteira) disponível para a produção do produto.

Em resumo, o objetivo deste trabalho foi atingido, pois a proposta de desenvolver um modelo de otimização para auxiliar o balanceamento da linha de forma eficiente foi alcançada.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização deste modelo para calcular o balanceamento de outras linhas de montagem, e pesquisas acerca de processos para a implementação eficiente e eficaz do modelo proposto na realidade fabril, a metodologia usada atualmente permeia há vários anos e os conceitos da programação não linear devem ser incorporada a cultura da empresa, facilitando a realização de trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, Roberto dos Reis; ANTUNES JR., José Antonio Valle. Takt Time: conceitos e contextualização dentro do sistema Toyota de produção. **Gestão & Produção**, v. 8, n. 1, p. 1-18, abr. 2001.
- COLIN, Emerson Carlos. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CRISTO, Ronaldo. **Balanceamento de linhas de montagem com uso de algoritmo genético para o caso de linhas simples e extensões**. 2010. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.
- DANTAS, Ozanival Dario; SILVA, Euzebio Medrado da; BARIONI, Luís Gustavo; OLIVEIRA, Marco Antônio Assfalk de; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. Comparação dos métodos GRG2 (*Solver* do Excel) e Downhill Simplex para a parametrização da função beta. In: XXXIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. A pesquisa operacional e o desenvolvimento sustentável. **Anais**, Fortaleza, 28 a 31 de agosto de 2007.
- DAVIS, Mark M.; AQUILANO, Nicholas J.; CHASE, Richard B. **Fundamentos da administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 2000.
- FARNES, Vanessa Carolina Fernandes; PEREIRA, Néocles Alves. Balanceamento de linha de montagem com o uso de heurística e simulação: estudo de caso na linha branca. **Revista GEPROS**, ano 2, v. 2, p. 125-136, jan./abr. 2007.
- FERNANDES, Flávio César Faria; GODINHO FILHO, Moacir; CUTIGI, Ricardo Augusto; GUIGUET, Aline Malerbo. O uso da programação inteira 0-1 para o balanceamento de linhas de montagem: modelagem, estudos de caso e avaliação. **Produção**, v. 18, n. 2, p. 210-221, 2008.
- GAITHER, Norman; FRAZIER, Greg. **Administração da produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2002.
- GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2012.
- GONÇALVES FILHO, Eduardo Vila. **Arranjo físico**. Apostila. São Carlos, SP: Universidade de São Carlos, 2005.
- GORGULHO JÚNIOR, José Hamilton Chaves. **Automação da manufatura**. Notas sobre: arranjos físicos. Itajubá: UNIFEI/IEPG, março de 2010. Disponível em: <[http://www.iem.unifei.edu.br/gorgulho/eme006/EME006\\_2010b\\_Arranjos\\_Fisicos.pdf](http://www.iem.unifei.edu.br/gorgulho/eme006/EME006_2010b_Arranjos_Fisicos.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2013.
- HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

LACHTERMARCHER, Gerson. **Pesquisa operacional na tomada de decisões**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEITE, Ronaldo Landim; DINIZ, Alexandre Magno Ferreira. Estudo do arranjo físico: o caso do gargalo de produção na manufatura de máquinas de costuras. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. **Anais**, Bauru, SP, 6 a 8 de novembro de 2008.

MARTÍNEZ, José Mário; SANTOS, Sandra Augusta. **Métodos computacionais de otimização**. Campinas, SP: IMEEC/UNICAMP, 1995.

MOREIRA, Daniel Augusto. **Administração da produção e operações**. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

MUTHER, Richard. **Planejamento do layout, sistema SLP**. Trad. Elisabeth de Moura Vieira, Jorge Aiub Hijjar e Miguel de Simoni. São Paulo: Edgard Blucher, 1978.

RAGSDALE, Cliff T. **Modelagem e análise de decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

SANTOS, Luciana Pucci; WAGNER, Ricardo. Processo decisório e tomada de decisão: um dualismo. In: V SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. **Anais**. Resende, RJ, 20 a 22 de outubro de 2008.

SIMARIA, Ana Sofia de Almeida. **Uma metodologia para o balanceamento de linhas de montagem**. 2001. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Gestão do Porto, Universidade do Porto, 2001.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

## **APÊNDICE**

## RELATÓRIO DE RESPOSTAS (EXCEL SOLVER)

### Célula de destino (Mín)

Célula	Nome	Valor original	Valor final
\$D\$11	Tempo ciclo proposto	0,00	9,92

### Células ajustáveis

Célula	Nome	Valor original	Valor final
\$D\$3	Padrão	0	260
\$E\$15	Op. 10 M.O. real	0	2
\$E\$16	Op. 20 M.O. real	0	2
\$E\$17	Op. 30 M.O. real	0	2
\$E\$18	Op. 40 M.O. real	0	4
\$E\$19	Op. 50 M.O. real	0	2
\$E\$20	Op. 60 M.O. real	0	2
\$E\$21	Op. 70 M.O. real	0	4
\$E\$22	Op. 80 M.O. real	0	2
\$E\$23	Op. 90 M.O. real	0	2
\$E\$24	Op. 100 M.O. real	0	2
\$E\$25	Op. 110 M.O. real	0	2
\$E\$26	Op. 120 M.O. real	0	4
\$E\$27	Op. 130 M.O. real	0	1
\$E\$28	Op. 140 M.O. real	0	4
\$E\$29	Op. 150 M.O. real	0	1
\$E\$30	Op. 160 M.O. real	0	1
\$E\$31	Op. 170 M.O. real	0	2
\$E\$32	Op. 180 M.O. real	0	2
\$E\$33	Op. 190 M.O. real	0	2
\$E\$34	C.Q M.O. real	0	2

Célula	Nome	Valor da célula	Fórmula	Status	Transigência
\$G\$15	Op. 10 LD	74	\$G\$15>=0	Sem agrupar	74
\$G\$16	Op. 20 LD	72	\$G\$16>=0	Sem agrupar	72
\$G\$17	Op. 30 LD	16	\$G\$17>=0	Sem agrupar	16
\$G\$18	Op. 40 LD	56	\$G\$18>=0	Sem agrupar	56
\$G\$19	Op. 50 LD	122	\$G\$19>=0	Sem agrupar	122
\$G\$20	Op. 60 LD	30	\$G\$20>=0	Sem agrupar	30
\$G\$21	Op. 70 LD	4	\$G\$21>=0	Sem agrupar	4
\$G\$22	Op. 80 LD	20	\$G\$22>=0	Sem agrupar	20
\$G\$23	Op. 90 LD	22	\$G\$23>=0	Sem agrupar	22
\$G\$24	Op. 100 LD	4	\$G\$24>=0	Sem agrupar	4
\$G\$25	Op. 110 LD	44	\$G\$25>=0	Sem agrupar	44
\$G\$26	Op. 120 LD	8	\$G\$26>=0	Sem agrupar	8
\$G\$27	Op. 130 LD	3	\$G\$27>=0	Sem agrupar	3
\$G\$28	Op. 140 LD	8	\$G\$28>=0	Sem agrupar	8
\$G\$29	Op. 150 LD	3	\$G\$29>=0	Sem agrupar	3
\$G\$30	Op. 160 LD	0	\$G\$30>=0	Agrupar	0
\$G\$31	Op. 170 LD	16	\$G\$31>=0	Sem agrupar	16
\$G\$32	Op. 180 LD	8	\$G\$32>=0	Sem agrupar	8
\$G\$33	Op. 190 LD	150	\$G\$33>=0	Sem agrupar	150
\$G\$34	C.Q LD	206	\$G\$34>=0	Sem agrupar	206
\$D\$4	Metragem utilizada (mts)	57,65	\$D\$4<=\$D\$5	Sem agrupar	2,349999963
\$D\$6	M.O. Nec_Total	38,60	\$D\$6>=\$D\$8	Sem agrupar	2,05
\$E\$15	Op. 10 M.O. real	2	\$E\$15=número	Agrupar	0
\$E\$16	Op. 20 M.O. real	2	\$E\$16=número	Agrupar	0
\$E\$17	Op. 30 M.O. real	2	\$E\$17=número	Agrupar	0

Célula	Nome	Valor da célula	Fórmula	Status	Transigência
\$E\$18	Op. 40 M.O. real	4	\$E\$18=número	Agrupar	0
\$E\$19	Op. 50 M.O. real	2	\$E\$19=número	Agrupar	0
\$E\$20	Op. 60 M.O. real	2	\$E\$20=número	Agrupar	0
\$E\$21	Op. 70 M.O. real	4	\$E\$21=número	Agrupar	0
\$E\$22	Op. 80 M.O. real	2	\$E\$22=número	Agrupar	0
\$E\$23	Op. 90 M.O. real	2	\$E\$23=número	Agrupar	0
\$E\$24	Op. 100 M.O. real	2	\$E\$24=número	Agrupar	0
\$E\$25	Op. 110 M.O. real	2	\$E\$25=número	Agrupar	0
\$E\$26	Op. 120 M.O. real	4	\$E\$26=número	Agrupar	0
\$E\$27	Op. 130 M.O. real	1	\$E\$27=número	Agrupar	0
\$E\$28	Op. 140 M.O. real	4	\$E\$28=número	Agrupar	0
\$E\$29	Op. 150 M.O. real	1	\$E\$29=número	Agrupar	0
\$E\$30	Op. 160 M.O. real	1	\$E\$30=número	Agrupar	0
\$E\$31	Op. 170 M.O. real	2	\$E\$31=número	Agrupar	0
\$E\$32	Op. 180 M.O. real	2	\$E\$32=número	Agrupar	0
\$E\$33	Op. 190 M.O. real	2	\$E\$33=número	Agrupar	0
\$E\$34	C.Q M.O. real	2	\$E\$34=número	Agrupar	0
\$E\$15	Op. 10 M.O. real	2	\$E\$15>=1	Sem agrupar	1
\$E\$16	Op. 20 M.O. real	2	\$E\$16>=1	Sem agrupar	1
\$E\$17	Op. 30 M.O. real	2	\$E\$17>=1	Sem agrupar	1
\$E\$18	Op. 40 M.O. real	4	\$E\$18>=1	Sem agrupar	3
\$E\$19	Op. 50 M.O. real	2	\$E\$19>=1	Sem agrupar	1
\$E\$20	Op. 60 M.O. real	2	\$E\$20>=1	Sem agrupar	1
\$E\$21	Op. 70 M.O. real	4	\$E\$21>=1	Sem agrupar	3
\$E\$22	Op. 80 M.O. real	2	\$E\$22>=1	Sem agrupar	1
\$E\$23	Op. 90 M.O. real	2	\$E\$23>=1	Sem agrupar	1
\$E\$24	Op. 100 M.O. real	2	\$E\$24>=1	Sem agrupar	1
\$E\$25	Op. 110 M.O. real	2	\$E\$25>=1	Sem agrupar	1
\$E\$26	Op. 120 M.O. real	4	\$E\$26>=1	Sem agrupar	3
\$E\$27	Op. 130 M.O. real	1	\$E\$27>=1	Agrupar	0
\$E\$28	Op. 140 M.O. real	4	\$E\$28>=1	Sem agrupar	3
\$E\$29	Op. 150 M.O. real	1	\$E\$29>=1	Agrupar	0
\$E\$30	Op. 160 M.O. real	1	\$E\$30>=1	Agrupar	0
\$E\$31	Op. 170 M.O. real	2	\$E\$31>=1	Sem agrupar	1
\$E\$32	Op. 180 M.O. real	2	\$E\$32>=1	Sem agrupar	1
\$E\$33	Op. 190 M.O. real	2	\$E\$33>=1	Sem agrupar	1
\$E\$34	C.Q M.O. real	2	\$E\$34>=1	Sem agrupar	1