



SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM  
COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL  
Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Tese de Doutorado

**A DISTRIBUIÇÃO DE CAPACIDADES E O  
DESEMPENHO DE LINHAS PRODUTIVAS:  
Uma análise sobre a utilização de *mix* de produtos**

Apresentada por: Rogério Flores da Silva  
Orientador: Renelson Ribeiro Sampaio

Dezembro de 2016

Rogério Flores da Silva

**A DISTRIBUIÇÃO DE CAPACIDADES E O  
DESEMPENHO DE LINHAS PRODUTIVAS:  
Uma análise sobre a utilização de *mix* de produtos**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Modelagem de Processos Industriais

Orientador: Renelson Ribeiro Sampaio

*SENAI CIMATEC*

Co-Orientador: Francisco Uchoa Passos

*SENAI CIMATEC*

Salvador  
SENAI CIMATEC  
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S586d Silva, Rogério Flores da

A distribuição de capacidades e o impacto no desempenho de linha produtiva: uma análise sobre a utilização de mix variados de produtos / Rogério Flores da Silva . – Salvador, 2016.

134 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Renelson Ribeiro Sampaio.

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2016.

Inclui referências.

1. Distribuição de capacidade. 2. Linha de produção. 3. Balanceamento de linha. 4. Mix de produção. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Sampaio, Renelson Ribeiro. III. Título.

CDD: 658.78

---

## Nota sobre o estilo do PPGMCTI

---

Esta tese de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (*download* na Página Web [http://ead.fieb.org.br/portal\\_faculdades/dissertacoes-e-teses-mcti.html](http://ead.fieb.org.br/portal_faculdades/dissertacoes-e-teses-mcti.html) ou solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

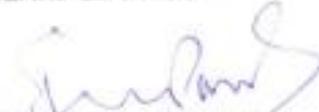
Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

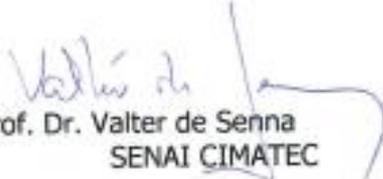
## Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

### Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

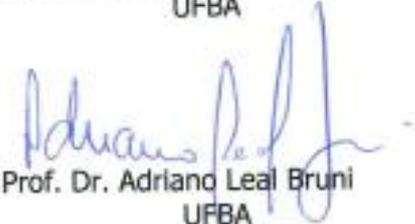
A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada "A distribuição de capacidades e o impacto no desempenho de linhas produtivas: uma análise sobre a utilização de mix variados de produtos", apresentada no dia 16 de dezembro de 2016, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

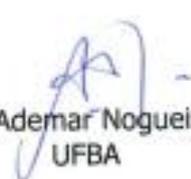
Orientador:   
Prof. Dr. Rênelson Ribeiro Sampaio  
SENAI CIMATEC

Coorientador:   
Prof. Dr. Francisco Uchoa Passos  
SENAI CIMATEC

Membro Interno:   
Prof. Dr. Valter de Senna  
SENAI CIMATEC

Membro Externo:   
Prof. Dr. Paulo Soares Figueiredo  
UFBA

Membro Externo:   
Prof. Dr. Adriano Leal Bruni  
UFBA

Membro Externo:   
Prof. Dr. Ademair Nogueira do Nascimento  
UFBA

Dedico este trabalho a meus pais, eterna fonte de inspiração.

---

## Agradecimentos

---

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Renelson Sampaio, que com paciência e confiança me acompanho durante todo o processo e meu co-orientador, Prof. Dr. Francisco Uchoa, que com muita calma e experiência foi indicando os caminhos a trilhar neste árduo, mas gratificante percurso. Em segundo lugar, gostaria de agradecer à minha família, que compreendeu as dificuldades que enfrentamos no processo de escrita de um trabalho de pesquisa e sempre apoiou minhas decisões, mesmo as mais questionáveis. Não poderia deixar de agradecer também aos colegas e professores do SENAI-CIMATEC, que revelaram um enorme sentimento de equipe e contribuíram com muito do que está aqui escrito.

Salvador, Brasil  
Dezembro de 2016

Rogério Flores da Silva

---

## Resumo

---

Há ainda uma considerável distância entre a prática empresarial e as pesquisas acadêmicas nos trabalhos relacionados ao projeto de linhas de produção, especialmente no que se refere à distribuição das capacidades produtivas. Dentre as lacunas que separam a prática empresarial da pesquisa acadêmica, há falta de estudos sobre os efeitos da inclusão de *mix* produtivos diversificados no desempenho da linha produtiva e sua relação com a distribuição de capacidade da linha. A tese defendida é de que as distribuições de capacidade desbalanceadas de formato linear ou em passo são menos atingidas pela utilização de *mix* diversificados, apresentando maior taxa de produção e menor nível de estoque, para configurações de linhas de produção discretas, em série, com até cinco estações de trabalho. Por meio de simulações com o *software* Witness e do desenvolvimento de um modelo computacional de simulação em Excel, foi testado o desempenho de seis diferentes configurações de capacidade antes e depois da introdução de uma condição especificada de *mix* de produtos. O resultado confirmou a tese de que a introdução de um *mix* produtivo em uma linha dedicada interfere no desempenho da linha, contudo as distribuições desbalanceadas em passo ou linear são menos impactadas quando comparadas às demais configurações. Os estudos acerca da distribuição capacidade em linhas de produção necessitam ainda de uma avaliação sobre a viabilidade do investimento em capacidade extra, já que os investimentos em bens de capital ou mão-de-obra adicionais são normalmente custosos. Assim, o modelo desenvolvido apresenta também uma análise de viabilidade para alteração da configuração de capacidade, o qual foi aplicado em uma linha produtiva real de produtos descartáveis de papel. Distribuição de capacidade, balanceamento de linha e teoria das restrições foram as principais fundamentações teóricas durante a pesquisa. Ao final do trabalho são sugeridas pesquisas futuras a partir do modelo computacional desenvolvido, visando ampliar o conhecimento sobre o tema e aproximar a discussão acadêmica da prática empresarial.

---

## Abstract

---

There is still a considerable gap between business practice and academic research in work relating to the design of production lines, especially in regard to the distribution of production capacity. Among the gaps that separate the business practice of academic research, there is the assessment of the product mix effects in the performance of the production line and its relation to the line's capacity distribution. The proposed thesis is that some unbalanced distributions capacity are less affected by the use of the product mix, with better performance, for serial assembly line configurations up to five workstations. Using Witness software simulation and a computational model designed in Excel, six different capacity distributions performance were tested before and after the introduction of a specific product mix condition. Results confirmed the thesis that the introduction of a mix of products in a dedicated production line adversely affects the performance of the line, however two unbalanced distributions with increasing capacities are less affected when compared to other configurations. Studies on the distribution of capacity in production lines still need an evaluation of the investment feasibility in extra capacity, since investment in capital goods or additional manpower are usually costly. Thus, the model also includes an algorithm for analysing the feasibility of capacity distributions that was applied in a real production line. Capacity line distributions, line balancing and theory of constraints are the main theoretical foundations for the research. Finally it is suggested future research using the computational model created in order to expand knowledge about the issue and to make academic discussions closer to the practitioners.

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Definição do problema . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	7
1.3	Importância da pesquisa . . . . .	8
1.4	Questões e hipóteses . . . . .	13
1.5	Limites e limitações . . . . .	16
1.6	Organização da Tese de Doutorado . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Revisão da literatura especializada</b>	<b>22</b>
2.1	Protocolo de revisão de literatura . . . . .	22
2.1.1	<i>Software</i> Mendeley Desktop . . . . .	23
2.1.2	<i>Systematic Review</i> - Distribuição de capacidades em linhas de produção	24
2.2	Conceitos fundamentais - Linhas de Produção . . . . .	30
2.3	Distribuição de capacidades de linhas . . . . .	34
2.3.1	Linhas balanceadas . . . . .	34
2.3.2	Linhas desbalanceadas . . . . .	39
2.3.3	Indicadores de balanceamento . . . . .	45
2.4	Mix de produção . . . . .	46
2.4.1	Mix e as capacidades produtivas . . . . .	52
2.5	Teoria das Restrições . . . . .	53
2.5.1	TOC e linhas produtivas . . . . .	54
2.5.2	Contabilidade de Ganhos . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Aspectos Metodológicos</b>	<b>59</b>
3.1	Apresentações dos aspectos metodológicos . . . . .	59
3.2	Planejamento de experimento - DOE . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Simulações e resultados</b>	<b>70</b>
4.1	Origem do modelo para simulação . . . . .	70
4.2	Simulação com o Witness . . . . .	73
4.2.1	Resultados do desempenho de configurações de capacidades . . . . .	76
4.3	Modelagem em Excel - Simulação de Monte Carlo . . . . .	78
4.3.1	Teste do Modelo Computacional . . . . .	79
4.3.2	Módulo gerador de dados aleatórios . . . . .	80
4.3.3	Módulo das configurações de capacidade . . . . .	81
4.3.4	Considerações sobre o impacto dos mix produtivos nas configurações de capacidade . . . . .	82
4.3.4.1	Indicador de impacto de <i>mix</i> . . . . .	83
4.3.5	Módulo dos mix produtivos nas configurações de capacidade . . . . .	86
4.4	Resultados encontrados . . . . .	87
4.4.1	Resultados de TR e WIP com diferentes configurações . . . . .	89
4.4.1.1	Teste de ANOVA para configurações de TR e WIP . . . . .	93
4.4.2	Resultados com a introdução de <i>mix</i> diversificados . . . . .	96

---

<b>5</b>	<b>Validação e análise de viabilidade</b>	<b>98</b>
5.1	Aplicação do experimento . . . . .	98
5.2	Análise de viabilidade . . . . .	101
5.2.1	Roteiro para análise . . . . .	101
5.2.2	Viabilidade do estudo de caso . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Conclusão e considerações finais</b>	<b>108</b>
6.1	Discussão dos resultados . . . . .	108
6.2	Limitações da pesquisa . . . . .	110
6.3	Possibilidade de trabalhos futuros . . . . .	111
<b>A</b>	<b>Documentos</b>	<b>113</b>
A.1	APÊNDICE I - Evolução do WIP e TR com o BE em um linha com <i>Bowl Shape</i> . . . . .	113
A.2	APÊNDICE II - Comparação de resultados: Witness e Simulador em Excel	115
A.3	APÊNDICE III - Dados de TR utilizados para teste de ANOVA . . . . .	116
A.4	APÊNDICE IV - Dados utilizados no estudo de caso . . . . .	117
A.5	APÊNDICE V - Histogramas dos dados das estações de trabalho - estudo de caso . . . . .	118
A.6	APÊNDICE VI - Exemplos de sistemas produtivos com até cinco estações de trabalho . . . . .	119
	<b>Referências</b>	<b>120</b>

---

## Lista de Tabelas

---

1.1	Limitações do modelo . . . . .	20
2.1	Resultados da pesquisa inicial . . . . .	26
2.3	Quantidade de trabalhos selecionados por periódico . . . . .	27
2.5	Resumo das principais contribuições sobre o tema . . . . .	28
2.6	Características de linhas simuladas . . . . .	44
3.1	Planejamento de experimento - DOE . . . . .	68
4.1	Tempo de ciclo das estações de trabalho . . . . .	75
4.2	Comparação Witness e Modelo em Excel . . . . .	79
4.3	Configuração de referência . . . . .	85
4.4	Configuração com IM positivo . . . . .	85
4.5	Configuração com IM negativo . . . . .	85
4.6	Configuração com IM negativo . . . . .	86
5.1	Custos de incremento de capacidade (R\$) . . . . .	106
A.1	Evolução do TR e WIP com a alteração do BE . . . . .	113
A.2	Comparação dos resultados de TR e WIP com Witness e modelo em Excel . . . . .	115
A.3	Dados de TR utilizados para ANOVA . . . . .	116
A.4	Dados levantados do caso para cada estação de trabalho . . . . .	117
A.5	Listagem de sistemas produtivos discretos com até cinco estações de trabalho . . . . .	119

---

## Lista de Figuras

---

1.1	Modelo de análise . . . . .	14
1.2	Tipos de processos em operações de manufatura (SLACK et al., 2002) . . . . .	17
1.3	Leiautes de processos e combinação volume-variedade (SLACK et al., 2008) . . . . .	18
2.1	Tela ilustrativa do Mendeley Desktop . . . . .	24
2.2	Resultado da pesquisa inicial no portal de periódicos CAPES . . . . .	25
2.3	Resultado da pesquisa inicial no Google Scholar . . . . .	26
2.4	Gráfico de precedência . . . . .	35
2.5	Critérios de alocação de capacidade (FRY; RUSSELL, 1993) . . . . .	42
4.1	Estrutura do jogo de dados . . . . .	72
4.2	Estrutura do simulador . . . . .	74
4.3	Características do tempo de ciclo de cada unidade . . . . .	75
4.4	Parâmetros do <i>buffer</i> . . . . .	76
4.5	Desempenho da linha com diferentes configurações . . . . .	77
4.6	Tela de abertura do módulo gerador de dados . . . . .	80
4.7	Tela de geração de dados . . . . .	81
4.8	Tela principal do simulador de configurações . . . . .	82
4.9	Tela principal do módulo de Mix e configurações . . . . .	87
4.10	Efeito do estoque inicial na evolução do TR . . . . .	88
4.11	Comparação TR: Balanceada, <i>Bowl</i> e Linear . . . . .	89
4.12	Comparação TR: Balanceada, Passo, Segmentado e <i>Bowl</i> invertido . . . . .	90
4.13	Comparação WIP: Balanceada, <i>Bowl</i> e Linear . . . . .	91
4.14	Comparação WIP: Balanceada, Passo, Segmentado e <i>Bowl</i> invertido . . . . .	92
4.15	Histograma valores de TR da configuração em <i>bowl shape</i> para ANOVA . . . . .	94
4.16	Normal Quantil dos valores de TR da configuração em <i>bowl shape</i> . . . . .	94
4.17	ANOVA dos valores de TR das diferentes configurações pelo Excel . . . . .	95
4.18	ANOVA dos valores de WIP das diferentes configurações pelo Excel . . . . .	96
5.1	Representação de processo - guardanapos embalados . . . . .	98
5.2	Histograma - Dados produção guardanapos embalados . . . . .	100
5.3	Simulação: produção de guardanapos embalados . . . . .	100
5.4	Tela de viabilidade para embalados . . . . .	107
A.1	Normal Quantil - TR . . . . .	117
A.2	Histogramas: Impressora e Acopladora . . . . .	118

---

## Lista de Siglas

---

AIL .....	<i>Average Inventory Level</i>
ALBP .....	<i>Assembly Line Balancing Problem</i>
BE .....	<i>Balance Efficiency</i>
BS .....	<i>Bottleneck Shiftiness</i>
BPP .....	<i>Bin Packing Problem</i>
CT .....	<i>Cycle Time</i>
CV .....	Coefficiente de variação
DBR .....	<i>Drumm-Buffer-Rope</i>
FMS .....	<i>Flexible Manufacturing System</i>
JIT .....	<i>Just In Time</i>
LE .....	<i>Line Efficiency</i>
LT .....	<i>Line Throughput</i>
IL .....	<i>Inventory Level</i>
IM .....	Indicador de mix
MALBP ....	<i>Mixed-model Assembly Line Balancing Problem</i>
MT .....	Tempo médio de processo ou <i>mean processing time</i>
MTBF .....	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTR .....	<i>Mean Time To Repair</i>
OPT .....	<i>Optimized Production Technology</i>
PPGMCTI ..	Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
ROI .....	<i>Return On Investment</i>
SI .....	<i>Smoothness Index</i>
TH .....	<i>Throughput</i>
TOC .....	<i>Theory Of Constraints</i>
TQC .....	<i>Total Quality Control</i>
WIP .....	<i>Work In Process</i>

## Introdução

---

Quanto mais sublimes forem as verdades, mais prodência exige o seu uso; senão, de um dia para o outro, transformam-se em lugares comuns e as pessoas nunca mais acreditam nelas.

(Nicolai Gógoi)

### **1.1 Definição do problema**

O projeto de sistemas de produção e a alocação de capacidade é um tema de alta relevância na engenharia industrial ([DOLGUI; GUSCHINSKY; LEVIN, 2001](#)). Sua construção está ligada a aspectos como a especificação da sequência de atividades necessárias para a produção de um bem ou serviço, o arranjo físico ideal, a quantidade de recursos utilizados, a determinação da quantidade de trabalho em cada centro de trabalho, entre outras questões importantes para o desempenho das operações da empresa. Por isso o projeto da linha produtiva se torna vital para o desempenho posterior das operações e deve envolver itens como custos de implantação, flexibilidade da linha, a qualidade final do produto ou serviço, o tempo de entrega ao mercado, o volume e diversidade dos itens, a eficiência com que esperam ser entregues os produtos ou serviços, entre outros importantes fatores.

De acordo com [Shaaban, McNamara e Hudson \(2014\)](#), as empresas gastam bilhões de dólares todos os anos no projeto, instalação, operação e manutenção de linhas de produção. Portanto, até mesmo pequenas melhorias em eficiência ou redução de custos de inventário podem resultar em economias substanciais sobre a vida de uma linha.

[Hudson, McNamara e Shaaban \(2015\)](#) afirmam que o objetivo dos projetistas de linha apresentado pela maior parte da literatura em manufatura é o de investigar como melhorar ou otimizar a eficiência das linhas de produção de acordo com uma grande variedade de objetivos, algumas vezes em conflito entre eles. As abordagens para atacar este problema envolveriam um vasto número de técnicas e métodos, refletindo a complexidade dos sistemas de produção.

[Slack et al. \(2008\)](#) destacam que o projeto das redes de suprimentos inclui a especificação da capacidade de operação de cada processo e, a menos que esta capacidade reflita as necessidades de todo o sistema, ela limitará o fluxo por meio da rede ou será a causa da subutilização da capacidade.

Adicionalmente, a complexidade dos sistemas produtivos muitas vezes é agravada pelo caráter estocástico de variáveis que fazem parte de algumas linhas de produção. Este caráter estocástico se dá devido a interferências de natureza diversa e dificulta ainda mais a atuação dos projetistas.

[Tempelmeier \(2003\)](#) destaca que os planejadores industriais, responsáveis por prover capacidade economicamente suficiente aos sistemas produtivos, são confrontados com um número de fatores de projeto que afetam constantemente a produtividade destes sistemas. Estes fatores estão normalmente sujeitos a influências estocásticas, como quebras de equipamento, tempos de processo variáveis, etc.

Já segundo [Rekiek et al. \(2002b\)](#), o principal objetivo dos projetistas de linhas de montagem é aumentar a eficiência da linha por meio da maximização da razão entre a produção e os custos necessários. Assim, quando trata-se do projeto de um sistema de produção, faz-se mister avaliar a performance das linhas de forma ampla, incluindo os impactos nos estoques e seus custos. De fato, para o projeto de um sistema produtivo é extremamente relevante a avaliação do desempenho do sistema, tanto no que se refere à produção realizada pela linha ([LI; BLUMENFELD; MARIN, 2008](#)) quanto no que se refere ao controle de estoque necessário para o atingimento desta produção ([AXSATER, 2006; SLOAN, 2001; ANDERSON; MOODIE, 1968](#)).

A maior eficiência de uma linha produtiva envolve soluções que buscam uma combinação dos seguintes objetivos:

- a) Maximizar o volume de produção ou taxa produtiva do sistema;
- b) Minimizar o ativos necessários para a operação do sistema, como os estoques de material, a quantidade de máquinas, mão de obra ou outros recursos;
- c) Minimizar os tempos de ciclo do processo e o tempo de atravessamento (*lead time*).

Eventualmente a minimização do tempo ocioso (*idle time*) dos recursos é incluída na esteira de objetivos. Mas este é um ponto de divergência entre alguns autores, posto que pode haver um conflito entre a redução dos estoques em processo e a redução do tempo ocioso de alguns tipos de recursos.

Dentre as diversas as abordagens, quando é especificado ou projetado um sistema produtivo, existe uma que considera a forma como a capacidade é distribuída em uma linha de montagem ([CHAKRAVORTY; ATWATER, 1996](#)). Entende-se capacidade como a quantidade máxima de itens que cada estação de trabalho consegue processar por unidade de tempo ou a quantidade máxima de trabalho que pode ser carregada na estação por unidade de

tempo. Desta maneira, uma prerrogativa básica no projeto de uma linha de produção é a determinação da capacidade de cada centro produtivo e a forma como esta capacidade é distribuída em suas condições normais de operação.

Outro ponto relevante no projeto da linha envolve os estoques de produtos em processo. Uma linha de montagem consiste de várias estações de trabalho em série em diferentes configurações, na maior parte das vezes com estoques de produto em processo (*buffers*) entre as estações de trabalho.

Estes *buffers* existem para evitar interrupções no processo, já que a quantidade de produção de cada centro de trabalho varia e, se um centro de trabalho produz menos que o centro seguinte em um determinado instante, há uma parada por falta de recursos. Da mesma forma, se o centro produz um volume superior ao seguinte, haverá um momento em que não existirá espaço para manter o *buffer* e o centro precedente terá que interromper a produção.

Conseqüentemente, outra variável endereçada no projeto de uma linha de montagem é a quantidade de *buffer* que será necessária para garantir a operação da linha sem interrupção. Powell e Pyke (1997) sugerem que muitos sistemas de produção precisam manter o mínimo de estoque de material em processo (WIP) devido a falta de espaço ou limitações de capital. Argumentam que, de fato, alguns defensores do JIT (*Just In Time*) recomendam a meta de estoque zero, o que traria como potenciais benefícios o baixo custo, necessidade de menos espaço, assim como uma resposta mais rápida em qualidade. Infelizmente, na presença de tempos de processo variáveis, a produção resultante da linha de montagem seria severamente restrita se nenhum WIP fosse mantido. Assim, as linhas de montagem seriam projetadas para manter o mínimo, mas não zero, capacidade de estoque. Somente a quantidade suficiente para minimizar o efeito da flutuações.

A capacidade produtiva usualmente está relacionada à presença de recursos custosos, como equipamentos ou força de trabalho. Se fosse baseada somente nestes custos, o projeto de uma linha de produção buscaria encontrar a menor capacidade necessária. Mas a mesma preocupação existe também para os *buffers*, igualmente custosos. É deste dilema que surge o Problema de Balanceamento de Linha de Montagem - *Assembly Line Balancing Problem* - ALBP (SALVESON, 1955), que não busca simplesmente a menor capacidade entre as estações, mas a mais adequada para que a linha tenha a performance ótima.

ALBP consiste em particionar otimamente a carga de trabalho total entre as estações de trabalho com o objetivo de minimizar o tempo ocioso total, conseqüentemente, maximizando a eficiência dos recursos (GENIKOMSAKIS; TOURASSIS, 2008). Desta forma, o balanceamento de linha e a distribuição das capacidades produtivas e dos estoques torna-se uma importante via para os projetistas de linhas de produção atingirem seu principal

objetivo, que é o de aumentar a eficiência da linha, maximizando a razão entre a taxa de produção e os custos necessários (REKIEK et al., 2002b).

Boysen, Fliedner e Scholl (2008) afirmam que, devido à necessidade intensiva de capital, a configuração de linhas produtivas é de grande importância para as empresas e tem atraído muita atenção dos pesquisadores. Porém, tendo em vista a variedade de situações e diferentes combinações de elementos que envolvem as linhas de produção, ainda há um espaço vazio entre os problemas de configuração reais e o *status* da pesquisa em ALBP. Como as linhas reais de produção se valem de vários elementos diferentes e inter-relacionados do problema, muitos pontos permanecem não estudados.

Assim, entre as linhas de trabalho vão sendo desenvolvidas abordagens com direções diversas do clássico ALBP, com o intuito de abranger configurações produtivas que não eram alcançadas pelos modelos anteriores. Considerando que os modelos originais do ALPB carregavam premissas não exequíveis em determinadas indústrias (como tempo determinístico de processo, produção de um único tipo de produto, etc.), a análise de linhas assíncronas e desbalanceadas começou a revelar situações em que o melhor desempenho poderia não ser obtido com a linha balanceada. De forma até contra intuitiva, linhas desbalanceadas, onde há uma quantidade maior de tempo ocioso em equipamentos não gargalos, algumas vezes apresentavam melhor performance (maior volume de produção e menos estoques) do que linhas perfeitamente balanceadas. (HILLIER; BOLING, 1966).

Entre os resultados das pesquisas sobre o desempenho das linhas desbalanceadas destaca-se o intitulado *Bowl Phenomenon*, quando a produtividade de determinada linha de produção é incrementada ao se desbalancear deliberadamente a distribuição de capacidade da linha seguindo um formato assemelhado ao corte interior de uma tigela. (HILLIER; SO, 1996)

Um outro aspecto que permanece ainda à margem dos modelos atuais, tanto de balanceamento quanto de desbalanceamento de linha, é a representação de linhas com *mix* variado de produtos que demandem diferentes tempos de processo. Nestas linhas é alternada a produção de modelos diferentes de produtos com as mesmas estações de trabalho.

Como o tempo necessário para uma estação de trabalho processar um material pode variar (e muitas vezes isso acontece) para a produção de itens diferentes, a introdução de um *mix* de itens geralmente altera as configurações de capacidade produtiva. O tempo de usinagem de uma peça, por exemplo, tende a estar relacionado à área usinada, ao acabamento da superfície, tipo de material e outras variáveis. Assim, é natural que peças diferentes tenham tempos de usinagem diferentes. O mesmo acontece com outros processos.

Com a crescente demanda por produtos customizados, tem sido muito comum a introdução de mix diversificados em uma mesma linha de produção. A flexibilidade de produto, segundo [Gupta e Goyal \(1989\)](#), é a habilidade de mudar de um produto para outro em um mesmo sistema, economicamente, rapidamente e dentro de um espectro definido de itens.

Outro ponto relevante está ligado aos tipos de linhas estudados. As linhas de produção não sincronizadas e desbalanceadas são de importância vital na manufatura, já que uma proporção considerável de indústrias se utiliza destes tipos de processos para prover um amplo leque de bens e serviços ([PIKE; MARTINJ, 1994](#)). Contudo, apesar da evidente relevância dos projetos de linhas produtivas na indústria e da ampla pesquisa já realizada, ainda existem muitas lacunas a serem cobertas para o melhor conhecimento das configurações de capacidade, especialmente em linhas desbalanceadas. A modelagem dos processos muitas vezes não se aproxima das situações reais e pouca aplicação prática tem sido relatada nos trabalhos. Torna-se eminente a necessidade de mais estudos para ampliar as fronteiras do conhecimento relativos ao desbalanceamento de linha e capacidade, especialmente no que se refere aos ganhos de desempenhos de linha.

Uma proporção considerável dos sistemas produtivos em países em desenvolvimento é composta por linhas de produção em série com poucas estações de trabalho, as quais vão sendo ampliadas, tornando-se gradativamente mais sofisticadas. Estas alterações na estrutura da linha são também acompanhadas de modificações no *mix* de produtos.

Muitas vezes, uma pequena modificação na matéria-prima, um formato com *design* mais atrativo, a inclusão de uma funcionalidade ou até mesmo uma simples diferenciação no processo de fabricação pode trazer vantagens para a inclusão de um produto no mercado, como uma maior atratividade pelo consumidor ou a redução do custo de produção.

No década de 1980, por exemplo, as grandes cervejarias brasileiras ofereciam somente um tipo de produto: a cerveja *pilsen* em embalagens de 600 ml. Gradualmente foram sendo inseridos novos itens, como cerveja em lata, garrafas pequenas, com desenhos estilizados, latas maiores, menores, garrafas de litro, sabores diferentes de cerveja, entre outros. A diferenciação do *mix* abre a possibilidade de maior demanda e desenvolvimento de novos mercados e maior lucratividade para estes fabricantes.

Uma fabricante japonesa de bicicletas utilizou a estratégia de fornecer bicicletas personalizadas para o cliente, montando as bicicletas a partir dos dados de tamanho e peso do ciclista. Assim, de acordo com o tamanho do braço e a altura, por exemplo, é fabricado o quadro adequado, com a distância mais adequada entre o selim e o guidom, altura para o pedal, etc. ([SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2009](#)).

No mercado de produtos descartáveis de papel, a impressão de desenhos em guardanapos ou embalagens traz a possibilidade de incluir a logomarca do cliente, o que eleva o valor percebido pelo produto. Já alguns fabricantes apostam na diminuição das dimensões dos guardanapos como opção para reduzir o custo de fabricação e segmentar mercado para o produto de acordo com o perfil do consumidor: restaurantes e hotéis mais sofisticados utilizariam guardanapos maiores, enquanto aqueles que buscam menores custos comprariam itens com dimensões reduzidas e papel de pior qualidade.

Adicionalmente, o mercado de países em desenvolvimento muitas vezes acaba apresentando opções para a fabricação de produtos locais, concorrendo com empresas estrangeiras, por meio da utilização de linhas de produção simples e dedicadas a um único tipo de produto. Aproveitando-se de custos logísticos menores do que os produtos estrangeiros e do baixo custo de investimento em capital, pequenas indústrias se utilizam de instalações com poucas estações de trabalho para iniciarem a produção de itens simples. Gradualmente vão sendo inseridas novas opções de diversificação e as linhas vão se tornando mais complexas. Surge assim um problema para a introdução de novos itens, que atinge muitas empresas no Brasil. Isso porque a introdução de novos itens ao *mix* de produtos processado na linha traz também problemas, como tempos maiores de equipamento parado para *set up* das máquinas, maiores perdas de material, além da própria alteração da configuração de capacidade da linha, já que os tempos de processamento são normalmente alterados para os novos itens.

O problema desta pesquisa está relacionado exatamente ao projeto de sistemas produtivos no tocante à distribuição de capacidade entre as estações de trabalho, levando em consideração *mix* variados de produtos. Apesar de diversos trabalhos já terem sido produzidos sobre o tema configurações de capacidade, ainda não foi apresentado um estudo extensivo sobre a dinâmica do uso de *mix* variados e como verificar a viabilidade de projetos balanceados ou desbalanceados. Este talvez seja mais um dos fatores que contribuem para a escassa aplicação de técnicas de distribuição de capacidade no projeto de linhas reais de produção.

Desta forma, como se dá a relação entre o as configurações de capacidade e o desempenho de linhas de produção com um *mix* diversificado de produtos? Fry e Russell (1993) apresentam um estudo sobre distribuições de capacidade e sugerem seis configurações típicas que podem proporcionar melhores resultados em performance no tempo para entrega do produto e nível de inventário: balanceada, em *bowl* (tigela), em 'V', linear, passo e segmentada. Será que algumas destas configurações de distribuição de capacidade reagem de forma melhor à introdução de *mix* variados de produtos?

A tese defendida é de que as distribuições de capacidade desbalanceadas com formato linear ou em passo (FRY; RUSSELL, 1993) são menos atingidas pela utilização de *mix*

diversificados, apresentando maior taxa de produção e menor nível de estoque, para configurações de linhas de produção discretas em série, com até cinco estações de trabalho.

Espera-se que o aprofundamento dos conhecimentos relacionados ao projeto de distribuição de capacidade de linhas produtivas traga ganhos consideráveis de eficiência e na utilização dos seus recursos, otimizando o desempenho das linhas e, conseqüentemente, das empresas. Assim, este trabalho deve colaborar para a pesquisa de projetos de capacidade nas áreas da administração e engenharia industrial.

## 1.2 *Objetivos*

Os objetivos de uma pesquisa devem informar o que está sendo proposto com o trabalho, ou seja, quais resultados espera-se alcançar e que contribuição efetivamente será proporcionada pela pesquisa (SILVA; MENEZES, 2005). De uma maneira ampla, este trabalho dedica-se a melhor compreender a dinâmica das distribuições de capacidade de sistemas de produção e sua influência no desempenho das linhas produtivas.

O objetivo geral da pesquisa é, então, de elaborar um modelo para a avaliação do desempenho de diferentes distribuições de capacidade de estações de trabalho, na fabricação de *mix* diversificados de produtos, em uma mesma linha produtiva. O modelo será capaz de representar uma linha de produção discreta existente de até cinco estações e propor alternativas de distribuições de capacidade que proporcionem um desempenho otimizado para esta linha.

Para alcançar este objetivo, torna-se necessário o desdobramento em objetivos específicos a serem realizados, que são os seguintes:

- a) Estabelecer os objetivos de desempenho a serem avaliados nas linhas estudadas;
- b) Selecionar as variáveis significativas que devem estar contidas no modelo a ser construído;
- c) Desenvolver um planejamento de experimento para os testes a serem realizados com o modelo;
- d) Elaborar um modelo computacional capaz de mensurar os objetivos de desempenho em função das variáveis significativas selecionadas;
- e) Testar o modelo em uma linha real de produção discreta de até cinco estações de trabalho.

### 1.3 Importância da pesquisa

Genikomsakis e Tourassis (2008) apontam que as linhas de montagem são de enorme importância, tanto na produção em massa quanto na customizada, porque trazem um custo unitário menor e possibilitam melhor eficiência na produção de bens.

*Considering the high capital requirements for an installation, assembly line design and management is of great relevance for practitioners. Significant research efforts have been aimed at specific challenges, such as assembly planning, assembly sequencing and production scheduling, that have a significant impact on production efficiency and costs. As manufacturing companies try to respond to competitive pressures, assembly lines even gained importance in low volume production of customized products (mass customization). Consequently, assembly line design problems do not only occur once prior to its organization, but rather continuously as shifts in the demand structure or the availability of new production technologies necessitate reconfiguration. (GENIKOMSAKIS; TOURASSIS, 2008)*

A pesquisa sobre as linhas de montagem, a distribuição das tarefas e seu projeto de capacidade não é recente. Os primeiros estudos sobre distribuição das capacidades com o balanceamento de linha remontam da década de 1950 (SALVESON, 1955), enquanto a pesquisa sobre as linhas desbalanceadas começou na década de 1960 (MURRELL, 1961; DAVIS, 1965), somente alguns anos após os primeiros artigos publicados sobre balanceamento de linha. Contudo, ainda hoje a literatura na área é apontada como escassa, principalmente por conta das lacunas ainda abertas sobre o tema.

Powell (1994) aponta a escassez na literatura e procura justificar esta insuficiência pelas características matemáticas utilizadas nos modelos, que não se adequam a cenários práticos e tornariam mais difíceis as análises de elementos presentes em linhas reais de fabricação.

Shaaban, McNamara e Hudson (2014) indicam como espaços ainda em aberto a avaliação da efetividade de linhas não confiáveis e apontam para falta de trabalhos que considerem linhas com estações com diferentes taxas de falha e ou reparo de equipamentos em diferentes posições da linha e estudos sobre a união de linhas de montagem não confiáveis.

Souza e Pires (1999) também destacam a importância de se estudar, utilizando-se principalmente de simulações, os efeitos resultantes das variabilidades dos processos produtivos e das diversas formas de se alocar capacidades produtivas aos recursos fabris. Powell e Pyke (1997) concluem que há a necessidade de uma pesquisa futura para investigar sistemas maiores e mais complexos.

Segundo Hillier (2013), poucos trabalhos tem sido voltados para a otimização da carga de trabalho incluindo os custos de material em processo (*work in process* - WIP). Radovilsky (1998) afirmam que abordagens em linhas desbalanceadas para identificar o tamanho

do espaço para estoque em processo (*buffer*) são muito empíricas e não consideram as flutuações no tempo de produção das unidades produtivas, finalizando sua pesquisa ainda apontando para a necessidade de se estudar os tamanhos dos *buffers* em linhas com vários produtos.

Chakravorty e Atwater (1996) declaram que, apesar do grande volume de pesquisa conduzida na área de projeto de linhas de produção, muito ainda há para ser aprendido. Hudson, McNamara e Shaaban (2015) fazem uma revisão dos trabalhos realizados sobre o desbalanceamento de capacidade por mais de meio século e concluem que muitas questões ainda precisam ser respondidas sobre o tema.

*The body of research reviewed above forms a small part of the research in this area, which has now spanned over 50 years...Following the review of the areas covered in this paper, several questions remain unanswered. (HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015)*

Craighead, Patterson e Fredendall (2001) indicam que um método importante para evitar faltas de materiais nos gargalos e garantir a produtividade da linha é por meio da adição de capacidade extra aos recursos não gargalos existentes no sistema. Porém a pesquisa nesta área ainda é limitada a poucos e muito básicos achados, sendo que precisa progredir substancialmente para que os gerentes possam tomar decisões melhor substanciadas a respeito de capacidade protetiva (capacidade extra, adicionada a recursos específicos) e projeto de linha.

Com relação às técnicas de desbalanceamento de capacidade, até mesmo o *bowl phenomenon*, que é uma das características de linha mais estudada nas configurações de capacidade produtiva, ainda precisa ser melhor compreendida. Hillier e So (1996) afirmam que, apesar do alto potencial de impacto, o *bowl phenomenon* permanece pouco compreendido e uma controversa curiosidade teórica tem gerado pouco impacto prático. Desta forma, a busca por distribuições de capacidade de trabalho as mais balanceadas possíveis entre as estações continuaria sendo a norma para a prática do projeto de linhas de produção.

Também Genikomsakis e Tourassis (2008) defendem que, até a data, o *bowl phenomenon* não tem sido adequadamente descrito sob condições controladas e o debate continua com relação à sua real natureza e significância para o projeto de configurações de linhas de montagem.

*To this day the bowl phenomenon has not been adequately described in controlled conditions and the debate continues regarding its true nature and significance for assembly line balancing. Yet it is the one consistent observation over the years that hints to the effect that solutions that appear to be incrementally better, perform worse under realistic conditions compared to their less optimal counterparts. (GENIKOMSAKIS; TOURASSIS, 2008)*

Ainda há muito espaço aberto e muita controvérsia quando se busca determinar as melhores condições para a aplicação de técnicas distintas de distribuição de capacidade no dimensionamento das linhas. [Powell e Pyke \(1997\)](#), por exemplo, defendem que a pesquisa prévia tem demonstrado que os sistemas desbalanceados podem atingir maiores taxas produtivas (*throughput* ou número de partes completadas por unidade de tempo) do que sistemas balanceados, de forma que os projetistas de linha podem deliberadamente criar linhas desbalanceadas, com excedente de capacidade em algumas estações.

[Shaaban, McNamara e Hudson \(2014\)](#) consideram que o foco da pesquisa na área tem em sua maior parte se concentrado em como melhor obter uma linha balanceada, mas a questão de como melhorar a eficiências das linhas desbalanceadas é que deveria ser melhor investigada. Afirmam que existem muito poucos estudos sobre os efeitos do desbalanceamento em linhas não confiáveis, bem menos do que estudos sobre linhas confiáveis.

Entre os autores que pesquisam as distribuições de capacidade utilizando-se de desbalanceamento, há, inclusive, os que afirmam que a existência de linhas perfeitamente balanceadas é pouco representativa. Segundo [Pike e Martinj \(1994\)](#), a existência de linhas de montagem perfeitamente balanceadas e sincronizadas, onde estoques de material em processo são desnecessários e onde são plenamente atendidas as premissas dos problemas gerais de balanceamento de linha, é muito rara.

De acordo com [Hudson, McNamara e Shaaban \(2015\)](#), os processos reais não são como as linhas idealmente balanceadas e, em muitas delas, a probabilidade de conseguir o balanceamento perfeito ou mesmo um balanceamento aproximado é muito baixa. Considera que o desbalanceamento nas linhas ocorre naturalmente, por conta de diferentes tempos médios de processo entre as estações de trabalho, variabilidades diferentes, falhas, etc.

De acordo com [Shaaban, McNamara e Hudson \(2014\)](#), na vida real, os tempos de processo têm se mostrado não idênticos em diferentes estações de trabalho, mesmo em linhas automatizadas. Em linhas manuais não cadenciadas, os operadores de cada estação podem trabalhar em diferentes tempos médio por diversas razões. Algumas dessas razões são intrínsecas às pessoas, como a capacidade física individual ou a motivação. Outras dependem da tarefa, que pode ser mais ou menos complexa, ou simplesmente porque a quantidade de trabalho ao longo da linha não pode ser igualmente distribuída em termos de tempo. Outra fonte de flutuação seria das paradas de produção que todas as linhas enfrentam devido a falhas nos equipamentos.

O ponto em comum na discussão é a percepção da distância que ainda há entre os modelos e a realidade das linhas de produção, refletindo-se na baixa utilização dos métodos pesquisados. De fato, segundo [Tenhiälä \(2011\)](#), o planejamento de capacidade não é a única área da gestão de operações onde os praticantes normalmente confiam em métodos

muito mais simples do que aqueles promovidos na literatura.

Tempelmeier (2003) afirma que muitos planejadores industriais parecem ainda de certa forma relutantes para aplicar os métodos analíticos disponíveis de planejamento de capacidade e poucas empresas usam estes modelos para linhas de produção, considerando estudos em firmas alemãs. Em muitos casos, de acordo com a pesquisa, os planejadores teriam somente conhecimento limitado sobre a existência de métodos de avaliação praticamente aplicáveis e problemas de otimização seriam resolvidos principalmente por meio de tentativa e erro. Isso resultaria em muita perda, por consumir muito tempo e prover soluções usualmente longe de serem ótimas.

Lucertini, Pacciarelli e Pacifici (1998) defendem que, apesar dos muitos trabalhos publicados sobre o projeto de linhas de montagem, um número muito pequeno de empresas se utiliza de técnicas publicadas para desenvolver suas linhas. Uma das razões seria que os modelos adotados usualmente para resolver os problemas sofrem de uma substancial falta de informação. Pouco trabalho teria sido feito para modelar a gama completa de considerações práticas do projeto de linhas de montagem. Na maior parte das vezes, por exemplo, os métodos de balanceamento tratam de linhas sem a conjunção ou separação de sub linhas. Os índices de performance mais comum são o tempo de ciclo e o número de estações, desprezando outros fatores que também afetam a performante do sistema.

Rekiet et al. (2002a) também consideram que a insuficiência de informação nos modelos existentes para representar a complexidade das linhas reais é uma das causas para a carência de trabalhos práticos no projeto de capacidade.

*Despite the number of works on assembly line design and balancing, academic algorithms are not used by industrial companies. This is because, despite their effectiveness and the easiness of their use, they use little data and suffer on substantial loss of information, solving fictitious rather than industrial problems. (REKIEK et al., 2002a)*

Assim, os trabalhos acadêmicos vem, pouco a pouco, reduzindo as lacunas que são necessárias para tornar os modelos mais próximos das linhas reais de produção. Driscoll e Thilakawardana (2001) consideram que as variações industriais no balanceamento de linha incluem mudanças de recursos como, por exemplo, estações em paralelo, recursos de locação fixa, zoneamento de estações e comprimentos de linha fixo. Citam neste ponto, também, a dificuldade de incluir a variação de produtos das linhas mistas ou flexíveis (*mixed and multi-models*), que são alvo desta tese.

O problema das linhas mistas ou com múltiplos produtos é extensivo a diversos tipos de indústrias. Em termos de linhas de montagem, são poucos os casos na atualidade de linhas dedicadas a um único tipo de material. Ainda assim, verifica-se que o tema é tratado apenas superficialmente em alguns trabalhos, revelando que a distância entre os

trabalhos acadêmicos e a realidade industrial continua grande, mesmo após décadas de pesquisa na área.

Boysen, Fliedner e Scholl (2008) afirmam que, apesar dos esforços de pesquisa referentes ao balanceamento de linha, parece haver uma ampla lacuna entre a discussão acadêmica e a prática aplicada. Levantamentos empíricos realizados na década de 1970 e 1980 revelaram apenas uma porcentagem muito pequena das companhias se utilizando de algoritmos matemáticos para configurações de planejamento, sendo que a aparente carência em estudos científicos mais recentes indicaria a manutenção, ou mesmo o alargamento, destas lacunas.

Genikomsakis e Tourassis (2008) também apontam que recentes e extensivas pesquisas no campo revelam que, apesar do enorme esforço no tema balanceamento, existe um considerável *gap* entre as demandas de um problema de linha de montagem real e o estado da pesquisa. Assim somente uma pequena porcentagem das companhias se utilizaria de algoritmos matemáticos para a configuração de linhas de montagem.

Este descompasso pode ser evidenciado quando, mesmo dada a relevância das linhas não cadenciadas e naturalmente desbalanceadas, uma menor quantidade de trabalhos é notada quando comparados aos estudos das linhas perfeitamente balanceadas. Powell e Pyke (1997) apontam que, quando comparada a intensidade de pesquisa, os trabalhos sobre linhas não cadenciadas e desbalanceadas são bem menos extensivos. Destacam que em alguns casos o sistema é desbalanceado, pois a velocidade das máquinas representa o tempo médio do processo, sendo que estes tempos estarão variando sempre em uma determinada amplitude. Em outros casos, a linha seria balanceada para um determinado produto, mas mudanças no projeto ou novos produtos (*mix*) introduziriam desbalanceamentos na linha.

Chiang, Urban e Xu (2012) também clamam pela pouca pesquisa com foco nas linhas não-cadenciadas e desbalanceadas. E, ainda mais recentemente, Hudson, McNamara e Shaaban (2015) resumem os anos de pesquisa na área apontando para a carência de estudos voltados para as distribuições de capacidade balanceadas, sendo que as desbalanceadas são especialmente frequentes em países com tecnologia menos avançada.

*Researchers have expended considerable effort on resolving how to best achieve balance since the identification of the line balancing problem, and this has led to a burgeoning field of research that continues today... Compared to the balanced lines, unbalanced lines have been the subject of much less research, and yet globalisation has meant that local outsourced manufacturers have to deal with unpaced manual lines, using seasonal or temporary labour in countries where technology is less advanced, where workers are not highly trained and motivated or where there is high labour turnover. (HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015).*

Adicionalmente, a originalidade do trabalho, ao investigar a dinâmica do *mix* produtivo, uma variável ainda não estudada com profundidade na pesquisa sobre os projetos de

distribuição de capacidade, amplia a importância desta tese, no sentido de aproximar a pesquisa acadêmica dos problemas de empresas reais.

Dois pontos merecem ainda ser destacados, dentre tendências que vem se intensificando nas últimas décadas no campo da gestão de operações:

- a) O crescimento das indústrias de bens de capital em economias em desenvolvimento, como a China, promovendo a oferta de maquinário com menores custos de aquisição;
- b) A ênfase dada à redução dos estoques nas empresas e nas cadeias de suprimentos, representada pelos processos conhecidos como *lean* (enxutos).

Segundo Nagurney (2010), a eficiente entrega dos produtos, assim como as vantagens competitivas advindas de cuidadosos controles de custos de estoques na produção e nas cadeias de suprimentos, já são bem entendidas como prioritárias por empresas de alta tecnologia. Assim, uma maior facilidade e um menor custo para adicionar capacidade extra aos sistemas, aliada com a constante pressão gerencial para reduzir estoques, podem conduzir a uma situação onde o desbalanceamento de capacidade se mostre, em muitas situações, mais favorável.

Resumindo, ainda há um considerável número de problemas a serem resolvidos e muita controvérsia envolvendo os procedimentos de projeto e gestão de capacidade. Esta tese procura justamente estabelecer parâmetros e ferramentas que facilitem a resposta a algumas perguntas ligadas ao projeto de capacidade. Desta maneira espera-se que as empresas possam ter critérios e meios mais objetivos para analisar as suas linhas, sejam existentes ou futuras e, a partir de então, ter opções para melhorar a sua produtividade e competitividade por meio de investimento em capacidade extra ou redistribuição de recursos produtivos.

## **1.4 Questões e hipóteses**

A pesquisa é fundamentada e metodologicamente construída objetivando a resolução ou o esclarecimento de um problema, segundo Silva e Menezes (2005). O problema é posto, então, como ponto de partida da pesquisa. Gil (1999) acrescenta que o problema é qualquer questão não resolvida e que é objeto de discussão, em qualquer domínio de conhecimento.

Neste trabalho, o problema envolve a dificuldade de se estabelecer, nos projetos de capacidade de sistemas produtivos, modelos que permitam maior aproximação de cenários

produtivos reais e ajudem a tomada de decisão. Isso se dá, em parte, pela complexidade e diversidade dos cenários, mas também pela falta de compreensão ampla ainda de muitos fenômenos que envolvem a distribuição de capacidades, o balanceamento e, principalmente, o desbalanceamento de linhas. São exemplos de fenômenos ainda não plenamente compreendidos o *bowl phenomenon*, a influência das paradas de manutenção e dos fatores humanos nas configurações e o efeito dos *mix* de produtos.

Portanto, um dos pontos que dificultam a mais direta aplicação dos modelos teóricos de planejamento de capacidade em situações reais é a carência de modelos que incluam a utilização de *mix* de produtos diversificados, presente em diversas aplicações industriais. E como uma das formas de se objetivar um problema de pesquisa é por meio da formulação de uma questão problema, a pergunta desta pesquisa é: **qual a relação entre o desbalanceamento da capacidade e a eficiência das linhas produtivas, com um *mix* diversificado de produtos na configuração estudada?**

A Figura 1.1 ilustra o modelo de análise sobre o qual a questão problema deve ser respondida.



Figura 1.1: Modelo de análise

Esta tese trata de uma pesquisa de modelagem relacionada ao projeto de sistemas produtivos, a distribuição de capacidades e os *mix* de produtos. Neste sentido, para desenvolver

a resposta a esta questão, deve-se traçar um roteiro que alcance várias outras perguntas. Abaixo estão enumeradas algumas destas questões, que devem ser respondidas ou melhor esclarecidas no decorrer do trabalho:

- a) Em que condições de distribuição de capacidade de uma linha de produção a introdução de um *mix* de produtos se mostra menos desfavorável?;
- b) Como se dá a interferência do *mix* de produtos na performance da linha sob diferentes configurações de distribuição de capacidade?
- c) Como analisar o ganho possível de ser obtido por meio de mudanças da configuração de capacidade durante o projeto?;
- d) Os aumentos de custos decorrentes do incremento de capacidade podem ser compensados por menores custos de estoques ou melhores performances produtivas?;

E para responder aos questionamentos desta pesquisa, foram formuladas hipóteses visando a verificação empírica dos objetivos definidos de acordo com o problema. As hipóteses são suposições colocadas como respostas plausíveis e provisórias para o problema de pesquisa. Elas ajudam a orientar o planejamento dos procedimentos metodológicos necessários à execução da pesquisa que buscará evidências que comprovem, sustentem ou refutem a afirmação feita na hipótese (SILVA; MENEZES, 2005).

A hipótese, representada pelo par de hipótese nula e alternativa, consiste na verificação se, de fato, a forma de distribuição de capacidade pode ser relacionada à capacidade da linha de produção reagir a *mix* diversificados.

- a)  $H_{1,0}$  O desempenho de linhas de produção com *mix* variados de produtos, no tocante à taxa produtiva e à quantidade de estoque em processo, não é alterado de forma significativa com a configuração de capacidade produtiva;
- b)  $H_{1,1}$  As linhas de produção com estruturas de distribuição de capacidades linear ascendente ou em passo reagem melhor à introdução de *mix* diversificados de produtos, tendo menor impacto no desempenho.

O teste de hipótese (ou teste de significância) é o procedimento padrão para testar uma afirmativa sobre uma propriedade da população (TRIOLA, 2005) e deve ser realizado de acordo com os dados obtidos durante o processo de coleta e as características de cada hipótese.

O nível de significância é a probabilidade de que a estatística de teste cairá na região crítica, quando a hipótese nula for verdadeira. A região crítica é o conjunto de todos os

valores da estatística de teste que nos fazem rejeitar a hipótese nula (MOORE et al., 2006). Para o teste destas hipóteses na tese será utilizado o nível de significância de 0,05 (ou 5%).

## 1.5 Limites e limitações

O objetivo central da tese está ligado à compreensão acerca da influência das configurações de distribuição de capacidade quando utilizados *mix* de produtos diversificados. Porém não é esperado que este estudo seja exaustivo a ponto de determinar todas as situações de processos produtivos para as quais cada configuração é recomendável. Nem tampouco será capaz de abranger todas as aplicações de linhas produtivas. Pela complexidade e extensão do tema, não há ainda sequer condições de se afirmar que as configurações existentes sejam excludentes ou complementares quando do desempenho com *mix* diferenciados.

Existe uma enorme gama de possibilidades para se trabalhar com as linhas de produção, envolvendo várias configurações alternativas, vários tamanhos de linha e várias combinações, que compreendem desde linhas de produção contínuas a processos em bateladas. Por isso seria inviável já buscar um modelo completo. Além do mais, todo modelo é uma pequena imitação de algo real (STERMAN, 2002) e seria absoluta pesunção buscar um modelo perfeito.

Slack et al. (2002) distinguem, com relação à organização das operações com diferentes características de volume e variedade, cinco grupos, representados na Figura 1.2. Consideram que os processos contínuos são os que trabalham com maiores volumes de produção, com variedade muito baixa e normalmente operando por períodos muito longos. Às vezes são literalmente contínuos no sentido de que os produtos são inseparáveis, sendo produzidos em um fluxo ininterrupto. À medida em que diminuem-se os volumes e aumenta-se a variedade, os processos produtivos quanto ao volume e variedade, podem ser subdivididos em massa, lotes ou bateladas, *jobbing* e projeto.

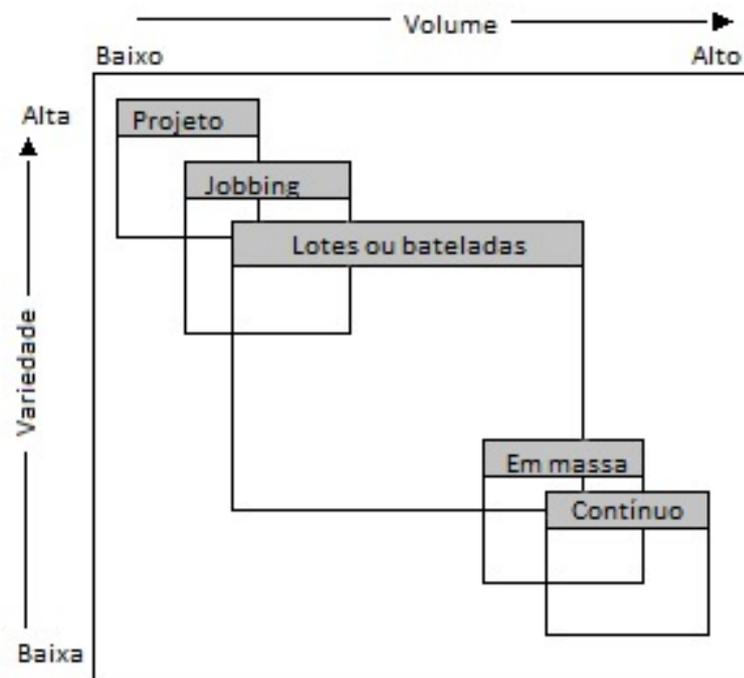


Figura 1.2: Tipos de processos em operações de manufatura (SLACK et al., 2002)

Posteriormente, Slack et al. (2008) agregam a esta caracterização o tipo de arranjo físico (*lay-out* ou leiaute), subdividindo-os em quatro grupos básicos (posição fixa, funcional, celular e de produto), classificados pelo volume e variedade conforme apresentado na Figura 1.3:

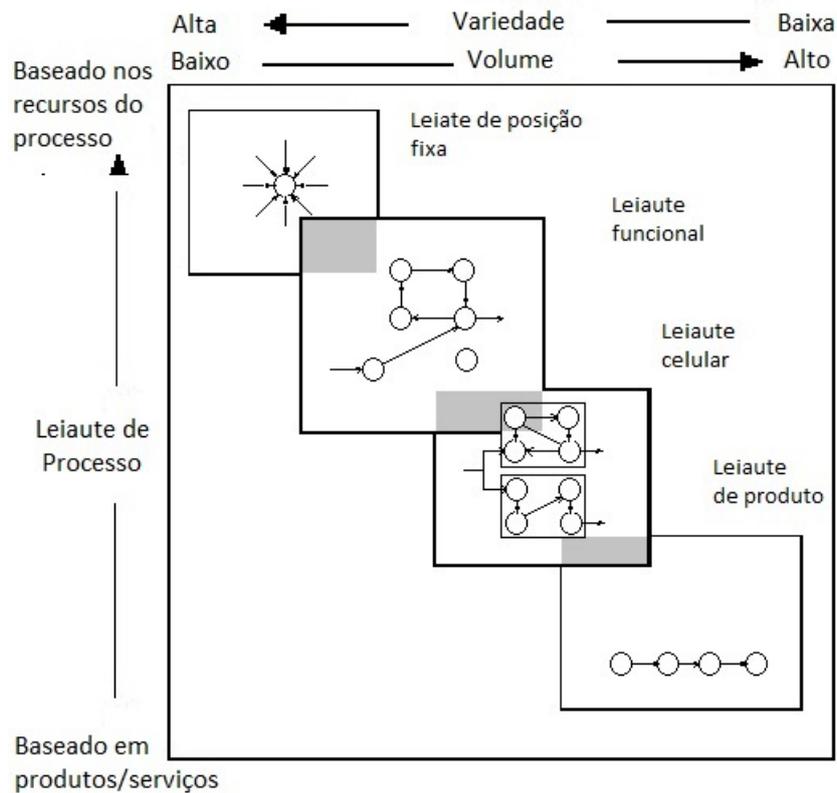


Figura 1.3: Leiautes de processos e combinação volume-variedade (SLACK et al., 2008)

As linhas de produção em regime contínuo são geralmente intensivas em capital e muito utilizadas para maiores volumes produtivos, como as empresas petroquímicas e de derivados, fabricação de papel, tratamento de água, etc. Já as linhas discretas abrangem autopeças, eletrônicos, eletrodomésticos, materiais descartáveis, alimentos, sendo tanto linhas com alto grau de complexidade e dezenas de estações de trabalho até linhas com duas estações de trabalho em sequência.

A tese defendida é de que as distribuições de capacidade desbalanceadas de formato linear ou em passo são menos atingidas pela utilização de *mix* diversificados, apresentando maior taxa de produção e menor nível de estoque, para configurações de linhas de produção discretas em série, com até cinco estações de trabalho. Desta forma, o leiaute de produto é o que representa o grupo das linhas de produção analisadas nesta tese.

A pesquisa será, então, limitada a sistemas discretos com até cinco estações em sequência, envolvendo seis distribuições distintas de capacidade baseadas no trabalho de Fry e Russell (1993). A opção por linhas menores, com até 5 estações de trabalho se deu primeiramente pela simplicidade, já que ao tratar com linhas mais curtas e modelos reduzidos, o número

de possíveis combinações de configurações é menor. Um segundo motivo é que, partindo de configurações simplificadas, torna-se possível evoluir para análises de modelos gradualmente mais complexos. Ademais, um volume maior de pesquisa acerca das distribuições de capacidade é feita em linhas menores, o que abre a possibilidade de comparações entre estudos.

As linhas de produção discretas em massa, com até cinco estações de trabalho, estão presentes em uma ampla gama de processos industriais, sendo bastante frequentes em empresas de pequeno e médio porte. O Apêndice A.6 apresenta um levantamento de algumas organizações com linhas de produção com arranjo físico por produto, produção em regime discreto e com até cinco estações de trabalho para ilustrar a diversidade de processos nos quais o modelo pode ser adequado.

Com relação à diversidade de *mix* a serem testados, também são impostas algumas limitações, por conta da ampla variedade de situações que podem ocorrer com a introdução de *mix* diversificados na linha. O primeiro aspecto é referente à alteração que o tempo médio de processamento pode sofrer em cada estação de trabalho. A introdução de um novo produto na linha teoricamente pode contemplar desde aumentos superiores a várias vezes o tempo inicial de processo em cada estação de trabalho ou até mesmo a não necessidade de processamento em determinada estação (tempo de processamento igual a zero). Assim, o modelo a ser testado estará limitado a aumentos ou reduções de até 100 % do tempo de processo original, que já respondem por uma boa parcela dos processos em indústrias linhas de montagem mais simples, como a de produtos descartáveis de papel e plástico.

Não serão incluídos no modelo os tempos de *set up* para o ajuste dos *mix* novos de produtos. Os tempos de parada de equipamentos impactam normalmente de maneira negativa e bem significativa a produtividade das linhas, contudo considera-se que são independentes da configuração de distribuição de capacidade original da linha.

No teste das diferentes opções de *mix* produtivo não serão avaliadas também alternativas de sequenciamento dos produtos durante a programação. Apesar da ordem de utilização dos produtos ter influência também no desempenho de muitas linhas produtivas, com desdobramento sobre tempos de *set up* (troca de produto na linha), resposta ao cliente, etc., a inclusão destas variáveis neste momento aumentaria sobremaneira a complexidade da simulação.

Os modelos elaborados estarão restritos à avaliação das capacidades produtivas independente dos possíveis cenários de demanda, sejam de alta, média ou baixa demanda.

A Tabela 1.1 resume as limitações do modelo que será utilizado para a tese.

Tabela 1.1: Limitações do modelo

Característica	Limite
Tamanho da linha	Cinco estações de trabalho
Tipo de linha	Produção discreta, em série, <i>lay-out</i> por produto
Tempo de ciclo	Distribuição normal
Estações de trabalho	Tempo de ciclo independentes, com mesma distribuição de probabilidade e mesma variabilidade
Multi-tarefa	Cada tarefa é executada em estação específica. Não há multi-tarefa
Tamanho do <i>buffer</i>	Ilimitado
Características do <i>mix</i>	Sem tempo de <i>set up</i> , tempo de ciclo podendo variar até 100% do tempo original, quando comparado à linha dedicada
Demanda	Não inserida no modelo. Demanda superior à capacidade
Sequenciamento	Não inserido no modelo. Ordem aleatória do <i>mix</i>
Manutenção	Tempo de paradas de manutenção não inserido no modelo

Por estarem restritas a condições de contorno que se aplicam somente a um grupo específico de empresas, é preciso muito cuidado para qualquer tipo de generalização sobre as conclusões obtidas desta tese, mesmo após a validação do modelo em uma ou mais linhas produtivas reais. Porém a comparação com resultados encontrados por outros trabalhos, similares ou não, assim como a compreensão de fenômenos que fiquem evidenciados com a ajuda do modelo computacional, podem trazer informações que ajudem a ampliar o conhecimento acerca do objeto em estudo.

## 1.6 Organização da Tese de Doutorado

Esta tese contém seis capítulos, que estão estruturados da seguinte forma:

- a) **Capítulo 1 - Introdução:** Contextualiza o âmbito no qual a tese está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos, importância da pesquisa, limites e limitações, questões e hipóteses, justificativas e como esta tese de doutorado está estruturada;
- b) **Capítulo 2 - Revisão da literatura especializada:** Apresenta a fundamentação teórica do tema desenvolvido na tese e o protocolo de revisão de literatura utilizado para a pesquisa;

- c) **Capítulo 3 - Aspectos metodológicos** Apresenta o arcabouço metodológico utilizado para a defesa da tese, assim como o planejamento de experimento para a pesquisa;
- d) **Capítulo 4 - Simulações e resultados:** Descreve a estrutura das modelagens utilizadas pelas simulações, apresenta os resultados encontrados, faz o tratamento e análise dos dados. Realiza os testes de hipótese e avalia seus resultados;
- e) **Capítulo 5 - Validação e análise de viabilidade:** Utiliza a simulação em uma configuração real de linha produtiva sob um *mix* diversificado, confronta os resultados da simulação com os resultados reais e propõe uma estrutura otimizada. Apresenta a análise de viabilidade para esta estrutura;
- f) **Capítulo 6 - Conclusão:** Apresenta a conclusão do trabalho após a análise dos resultados, faz as considerações finais e aponta trabalhos futuros a serem realizados.

## Revisão da literatura especializada

---

A educação não é só um processo social, é desenvolvimento.  
Não é preparação para a vida, é a própria vida.

(John Dewey)

Para uma melhor estruturação do trabalho, este capítulo é subdividido em cinco partes. Na primeira, é apresentado o protocolo de revisão de literatura contendo o detalhamento do método empregado para escolha da bibliografia utilizada.

Na segunda, são apresentados os conceitos fundamentais ligados ao tema de projeto de sistema de produção, com as definições que se revelam pré requisitos para as discussões subsequentes.

A terceira seção apresenta uma revisão sobre os problemas de distribuição de capacidade entre linhas produtivas, destacando os trabalhos envolvendo balanceamento e desbalanceamento de capacidades, que compõem o núcleo central da pesquisa.

A seção seguinte traz o tema dos *mix* produtivos e resume como as principais pesquisas abordam a temática.

Finalmente, na última seção serão revisados os conceitos relativos à teoria das restrições e à contabilidade de ganhos, que se fazem necessários para a complementação final do trabalho, com a análise da viabilidade das propostas para a linha trabalhada no estudo de caso.

### **2.1 Protocolo de revisão de literatura**

O tema de distribuição de capacidades em linhas produtivas revela-se algumas vezes controverso, motivando defesas acirradas e discordâncias quanto à melhor configuração a ser utilizada, a exemplo de Hillier e Boling (1966) e Payne, Slack e Wild (1972). De certa forma, o posicionamento paradigmático diversificado é possível de ser identificado em praticamente todas as áreas da ciência e, apesar de motivar discussões salutares, pode resultar em trabalhos tendenciosos e enviesados. A concentração não justificada da pesquisa de em um determinado posicionamento, em detrimento da avaliação de outras abordagens pode

deixar de fora variáveis significativas do objeto de estudo ou enfraquecer a sustentação de uma tese.

Com a finalidade de minimizar o viés durante a consulta dos estudos publicados e não publicados em uma área de estudo, torna-se importante a utilização de ferramentas e métodos bibliométricos adequados. Para esta tese, a ferramenta de controle e gestão bibliográfica utilizada foi o *software* Mendeley Desktop, enquanto a metodologia de revisão de literatura foi o *Systematic Review*.

### 2.1.1 *Software Mendeley Desktop*

O *Software* Mendeley Desktop é um dos diversos sistemas bibliométricos para a organização e gerenciamento de bibliografias, assim como o EndNote o Zotero. Estes sistemas auxiliam os pesquisadores utilizando-se de três funções básicas: busca de literatura, armazenamento em um banco de dados pessoal ou compartilhado e inserção das referências nos manuscritos seguindo os padrões estabelecidos.

O aumento do volume de produção científica, juntamente com o acúmulo e maior fluxo de informações resultantes da evolução da informática, fizeram com que a elaboração de uma revisão bibliográfica contendo trabalhos cientificamente relevantes se tornasse muitas vezes uma tarefa exaustiva. Utilizando-se de sistemas de gestão bibliográfica é possível armazenar os arquivos digitais, separar por data, autor, título, local de publicação, além de consultar bases de dados disponibilizadas por outros pesquisadores e armazenar a bibliografia na WWW.

O Mendeley Desktop foi o sistema utilizado desde o início da pesquisa, com o objetivo de facilitar a busca e consulta dos materiais relevantes. Dois foram os temas utilizados para a separação dos arquivos: planejamento de capacidade e *mix* de produtos (*product mix*), conforme exposto na Figura 2.1.

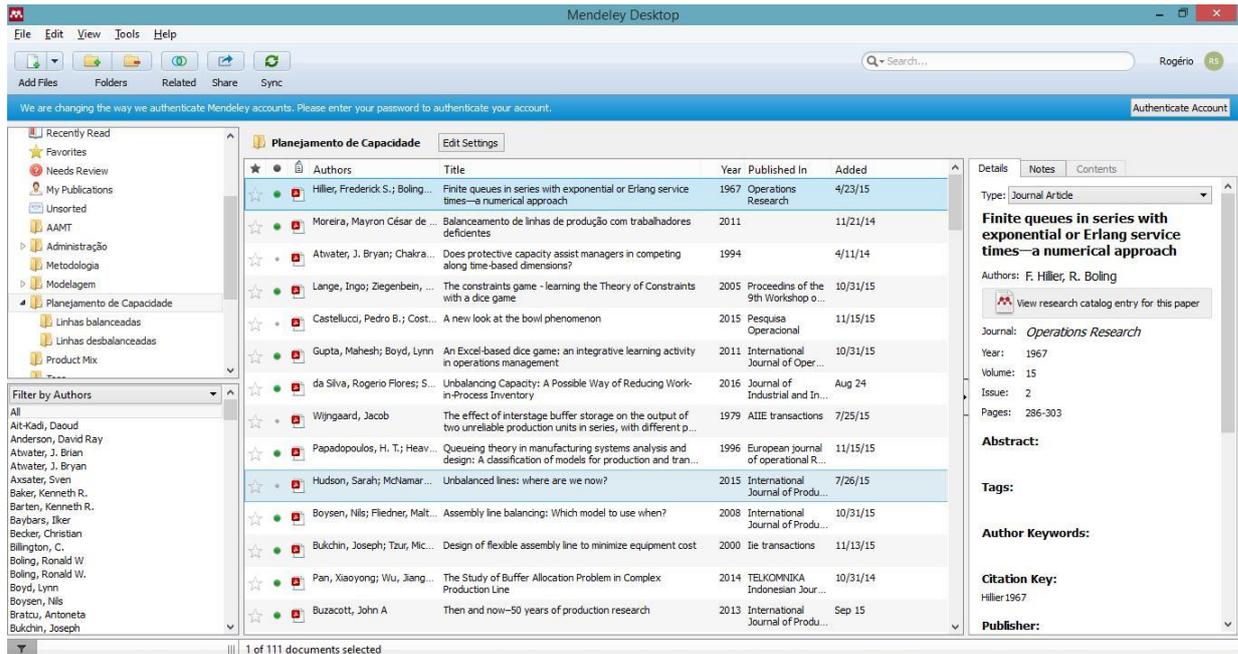


Figura 2.1: Tela ilustrativa do Mendeley Desktop

Dentro do tema planejamento de capacidade, duas outras subpastas foram destacadas; uma referente aos trabalhos sobre balanceamento de capacidade e outra direcionada aos estudos sobre desbalanceamento de capacidade.

### 2.1.2 *Systematic Review - Distribuição de capacidades em linhas de produção*

*Systematic Review*, ou revisão sistemática, é uma revisão de literatura realizada de acordo com um método explícito, rigoroso e transparente (GREENHALGH et al., 2005). Demanda tipicamente repetidas interações da questão de pesquisa, cobrindo diferentes abordagens e uma combinação de dados qualitativos e quantitativos.

Tranfield, Denyer e Smart (2003) afirmam que a *Systematic Review* difere das revisões narrativas tradicionais por adotar um processo replicável, científico e transparente. Ou seja, trata-se de uma metodologia detalhada que visa minimizar o viés por meio de pesquisas exaustivas na literatura, possibilitando rastrear e auditar as decisões, procedimentos e conclusões.

Três são os estágios da *Systematic Review*: planejamento da revisão, condução da revisão e reporte e disseminação da revisão. No planejamento da revisão, os passos envolvem a identificação da necessidade da revisão, a preparação de um propósito para a revisão e o

desenvolvimento de um protocolo de revisão.

Na condução da revisão, os passos são a identificação da pesquisa, a seleção dos estudos, a avaliação da qualidade dos estudos, a eliminação dos trabalhos não relevantes com o monitoramento do progresso e, finalmente, a síntese dos dados e dos trabalhos selecionados. Os passos da etapa de reporte e disseminação envolvem o relato e as recomendações e a seleção das evidências.

Nesta tese, a identificação da pesquisa, tanto no âmbito nacional como no internacional se fez por meio de duas bases de dados principais: o Portal CAPES e o Google Scholar. Sem o estabelecimento de linha de corte temporal, com a finalidade de compreender a origem e o desenvolvimento da pesquisa sobre o tema, o trabalho foi iniciado com o uso de duas expressões comumente empregadas no tema: balanceamento de capacidade (*balancing capacity*) e desbalanceamento de capacidade (*unbalancing capacity*).

Como resultado, para *balancing capacity* foram encontrados aproximadamente 364 documentos no Portal CAPES e 2.180 no Google Scholar (os números do Google Scholar são aproximados), conforme a Figura 2.2 e a Figura 2.3.

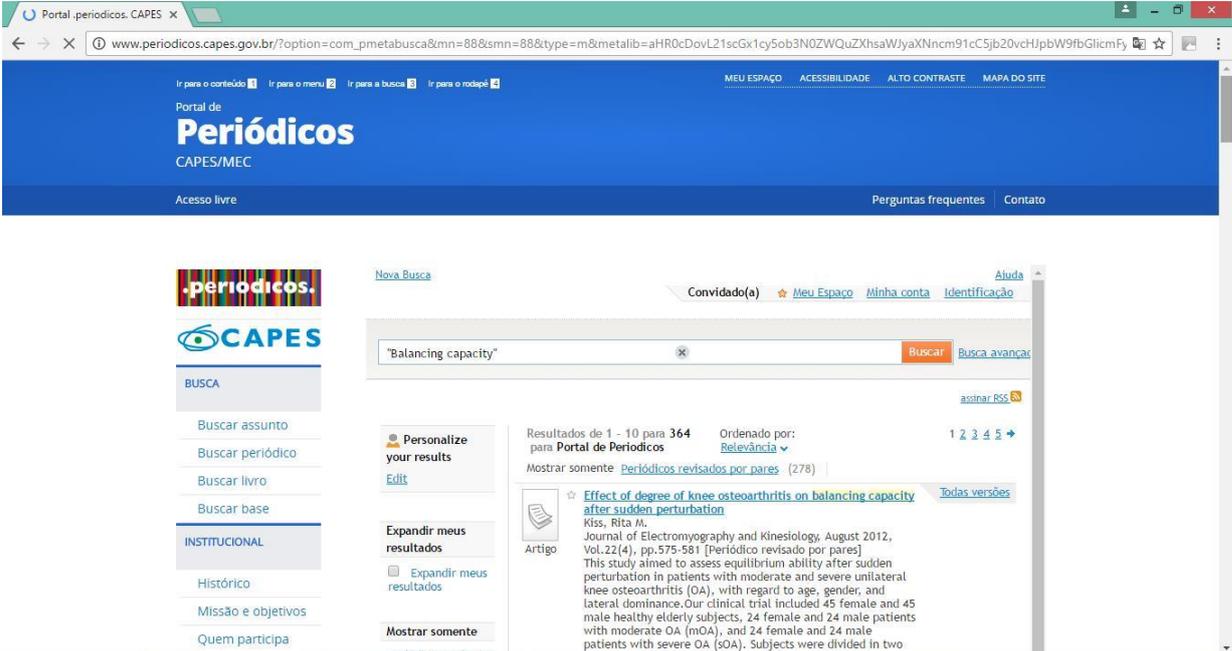
The image is a screenshot of a web browser displaying the CAPES Periódicos portal. The browser's address bar shows the URL: www.periodicos.capes.gov.br/?option=com\_pmetabusca&mn=88&smn=88&type=m&metalib=ahR0cDovL21scGx1cy5ob3N0ZWQuZXhsaWJyaXNcm91c5Jb2vcHJpbW99bGlicmFy. The page header is blue with the text 'Portal de Periódicos CAPES/MEC'. Below the header, there are navigation links like 'Acesso livre', 'Perguntas frequentes', and 'Contato'. The main content area has a search bar containing the text 'Balancing capacity'. To the left of the search bar, there are navigation options: 'BUSCA' (with sub-options: 'Buscar assunto', 'Buscar periódico', 'Buscar livro', 'Buscar base') and 'INSTITUCIONAL' (with sub-options: 'Histórico', 'Missão e objetivos', 'Quem participa'). To the right of the search bar, there are links for 'Nova Busca', 'Convidado(a)', 'Meu Espaço', 'Minha conta', and 'Identificação'. Below the search bar, the results show 'Resultados de 1 - 10 para 364 para Portal de Periódicos'. The first result is an article titled 'Effect of degree of knee osteoarthritis on balancing capacity after sudden perturbation' by Kiss, Rita M., published in the Journal of Electromyography and Kinesiology, August 2012, Vol. 22(4), pp. 575-581. The article is marked as 'Periódico revisado por pares'.

Figura 2.2: Resultado da pesquisa inicial no portal de periódicos CAPES

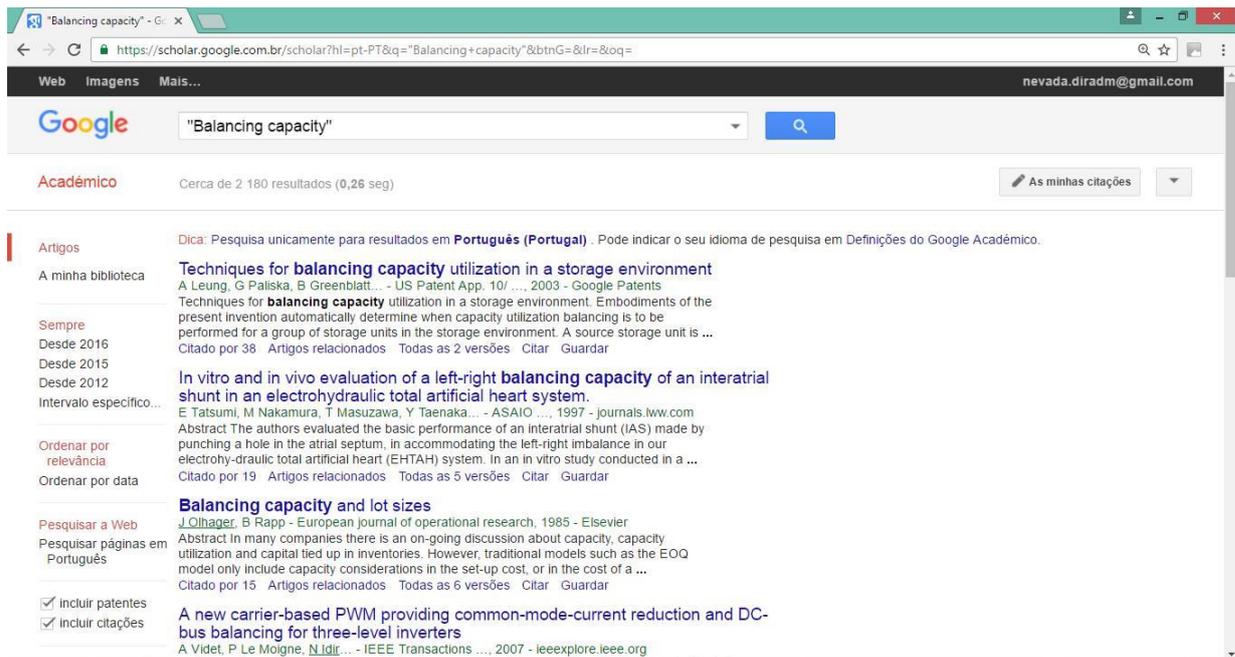


Figura 2.3: Resultado da pesquisa inicial no Google Scholar

Como o termo 'capacidade' pode ser tema em diversas áreas da ciência, com abordagens também diferentes, como capacidade metabólica, na biologia, capacidade de processamento, na ciência da computação, capacidade de investimento, na administração, entre diversos outros exemplos, o mesmo ocorrendo com o termo 'balanceamento', o procedimento foi realizado novamente introduzindo outras palavras e expressões chave como *unbalancing capacity*, *capacity distribution* e inserindo as expressões *assembly line* e *production line* para refinar a pesquisa. Assim foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Resultados da pesquisa inicial

Palavra-chave	Portal CAPES	Google Scholar
"Balancing capacity"	364	2.180
"Unbalanced capacity"	33	221
"Capacity distribution"	2.041	8.190
"Assembly line" + balancing	1.428	46.900
"Assembly line" + imbalance	24	13.900
"Production line" + balancing	220	21.400
"Production line" + imbalance	20	9.830
Total	4.130	102.261

As etapas de seleção dos estudos, análise da qualidade e eliminação dos trabalhos não relevantes foram realizadas por meio da avaliação do título e do resumo dos trabalhos, seguindo a ordem de relevância apresentadas pelos portais. Assim, foram identificados e retirados os trabalhos duplicados, os que não se adequavam ao tema e os que abordavam o tema utilizando-se de um perspectiva que não interessava ao estudo.

À medida que os trabalhos mais relevantes eram identificados e analisados, buscava-se investigar as referências de cada pesquisa, de forma a levantar outros trabalhos anteriores que poderiam ser importantes para a tese.

A seleção final da bibliografia resultou em uma total de 129 artigos publicados em periódicos especializados, dos quais 6 artigos de revisão, 8 publicações em congressos científicos e 25 livros, sendo verificada uma forte concentração em um dos periódicos, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Quantidade de trabalhos selecionados por periódico

Periódico	Quantidade
The International Journal Of Production Research	27
IIE transactions	8
Management science	5
International journal of production economics	5
European Journal of Operational Research	5
Production Planning & Control	4
Journal of operations management	4
Journal of Industrial Engineering	3
International Journal of Operations & Production Management	2
International Journal of Manufacturing Technology and Management	2
Queueing systems	2
Operations Research	2
Outros	60
Total	129

Com a leitura crítica do inteiro teor dos trabalhos, foram selecionados os dezenove estudos que tratavam mais diretamente do tema de distribuição de capacidade relacionadas ao desempenho das linhas produtivas. A Tabela 2.5 apresenta um resumo da abordagem destes principais trabalhos publicados que tratam o tema das linhas com capacidades balanceadas ou desbalanceadas, seguindo uma ordem cronológica.

Tabela 2.5: Resumo das principais contribuições sobre o tema

Trabalho	Abordagem
Davis (1965)	Por meio de simulação compara o desempenho de linhas não cadenciadas de diversos formatos com linhas cadenciadas.
Hillier e Boling (1977)	Avalia analiticamente desempenho de linhas de produção desbalanceadas comparando com linhas balanceadas com até três estações de trabalho.
El-Rayah (1979)	Usa simulações para testar o efeito de diversos tipos de desbalanceamento em taxa de produção e nível de estoques sob diversas configurações.
Hillier e Boling (1979)	Testa resultados para configuração ideal de linhas desbalanceadas mudando o número de estações da linha, o espaço disponível para estoque e a variabilidade dos tempos de operação.
Gershwin e Schick (1983)	Apresenta um modelo analítico de uma linha de três estações de trabalho não confiáveis com <i>buffers</i> finitos.
Smunt e Perkins (1985)	Testa desempenho da robustez de linhas com o Bowl Phenomenon por meio de simulações.
Atwater e Chakravorty (1994)	Analisa o efeito da capacidade protetiva em linhas de JIT e em linhas com um gargalo e o efeito do tamanho e da frequência das interrupções.
Lawrence e Buss (1994)	Avalia a capacidade adicional acrescentada no não gargalo e o efeito no <i>Bottleneck Shiftiness</i>
Chakravorty e Atwater (1996)	Testa o desempenho de 3 configurações diferentes, com TOC, JIT e linha balanceada.
Hillier e So (1996)	Avalia a robustez do <i>Bowl Phenomenon</i> testando o erro na estimativa de desbalanceamento e a performance da linha.
Powell e Pyke (1997)	Desenvolve uma heurística de regras que podem ser utilizadas para melhorar linhas simples com tempos de processo aleatório e testa em linhas mais longas - 4 estações.
Souza e Pires (1999)	Apresenta uma análise quantitativa do balanceamento e uso de capacidade excessiva nos recursos produtivos.

Craighead, Patterson e Fredendall (2001)	Avalia qual a melhor posição para alocar capacidade protetiva em uma linha desbalanceada.
Patterson, Fredendall e Craighead (2002)	Alterna diferentes níveis de capacidade protetiva nos não gargalos e verifica impactos no tempo médio de processo e no <i>Bottleneck Shiftiness</i>
Nahas, Ait-Kadi e Nourelfath (2006)	Propõe um algoritmo para resolver o problema da alocação ótima de <i>buffer</i> em linhas longas de produção.
Hillier (2013)	Avalia a alocação de <i>buffer</i> e de carga de trabalho em linhas não cadenciadas a fim de propor heurísticas para otimizar TR e reduzir custo de estoque. Apresenta um modelo para linha com três e quatro estações e usa simulação para linhas mais longas - sete estações.
Shaaban, McNamara e Hudson (2014)	Investiga os benefícios de deliberadamente desbalancear tempos de ciclo para linhas automatizadas não confiáveis utilizando simulação em linhas com vários tamanhos, capacidades de <i>buffer</i> , graus e padrões de desbalanceamento.
Castellucci e Costa (2015)	Analisa a presença do <i>Bowl Phenomenon</i> em linhas com tempos de trabalho inteiros por meio de simulação.
Hudson, McNamara e Shaaban (2015)	Faz uma revisão de literatura sobre os trabalhos produzidos sobre o desbalanceamento de linha.

Com o uso do *Systematic Review*, percebe-se que as pesquisas sobre as distribuições de capacidade concentram-se na avaliação da dinâmica do desbalanceamento em diferentes condições de operação e na proposição de métodos para balanceamento. São feitas, por exemplo, comparações de linhas com diferentes características, com tamanhos diferentes, avaliações sobre o posicionamento e o tamanho dos estoques intermediários, os *buffers*, entre outras investigações. Porém não é encontrada nestes trabalhos nenhuma investigação mais profunda sobre o efeito de *mix* variado de produção e seu impacto nas capacidades operacionais.

Verifica-se, desta forma, que o assunto da utilização das linhas com *mix* diversificados de produtos é tratado apenas superficialmente, mencionando os *mixed models* e tratando-os

como uma sucessão de modelos de linhas dedicadas.

Assim, a utilização do protocolo de revisão de literatura ajuda a eliminar possíveis vieses durante o levantamento bibliográfico, mas serve também para reforçar a característica inovadora da tese do estudo, de que as configurações de distribuição de capacidade desbalanceadas linear e em passo são menos impactadas pela introdução de *mix* diversificados de produtos.

## 2.2 Conceitos fundamentais - Linhas de Produção

As definições apresentadas nesta seção, apesar de muitas vezes excessivamente didáticas, revelam-se pré-requisito para as discussões subsequentes, referentes à distribuição de capacidades produtivas de linhas produtivas. Assim, tornam-se importantes para estabelecer a padronização da terminologia e garantir a melhor compreensão da sustentação a ser empregada para a tese.

Segundo [Hopp e Spearman \(2011\)](#), uma linha de produção nada mais é do que o conjunto de diversas estações de trabalho em sequência, que pode se apresentar sob várias configurações, com o objetivo de processar um produto ou realizar um serviço, com a possibilidade de estoques de material em processo (ou filas) entre as estações de trabalho. A linha de produção, de acordo com ([DALLERY; GERSHWIN, 1992](#)), é também conhecida como linha de fluxo.

As linhas de produção têm sido amplamente analisadas na literatura da área de gestão de operações pela relevância que apresentam no campo da manufatura. [Genikomsakis e Tourassis \(2008\)](#) afirmam que as linhas de produção tem adquirido importância até mesmo na produção de itens customizados, devido à pressão competitiva que a manufatura vem sofrendo para a redução de custos.

Infelizmente, a terminologia utilizada na gestão das operações não é padronizada e isso pode trazer dificuldades na comunicação e entendimento dos conceitos ([HOPP; SPEARMAN, 2011](#)). Assim, é importante estabelecer cuidadosamente os termos a serem utilizados, atentando, quando possível, para fontes onde a nomenclatura possa ser utilizada de outra forma. Para esta pesquisa os conceitos serão utilizados com o significado definido por [Hopp e Spearman \(2011\)](#):

- a) Estação de trabalho pode ser caracterizada por uma máquina, conjunto de máquinas ou mesmo funcionários que desempenhem um ou mais processos de transformação para o produto ou serviço. A estação de trabalho é também a coleção de uma

ou mais máquinas ou estações manuais que executam essencialmente uma mesma função, podendo ser chamada também de estação, centro de trabalho, ou centro de processo;

- b) Uma linha de montagem é uma linha de produção específica, que realiza processos de montagem de peças ou componentes;
- c) A produtividade, ou taxa produtiva (*throughput* - TR) é o resultado médio obtido de um processo em unidades produtivas por unidade de tempo. A quantidade produzida em toneladas por dia, hectolitros por hora, peças por minuto, ou outras unidades, são exemplos de medidas de produtividade;
- d) A capacidade é o limite superior da produtividade em um processo produtivo. Em alguns momentos, contudo, o termo pode ser utilizado como valor médio;
- e) O estoque de material em processo (*Work In Process* - WIP) é a quantidade de material estocado ou inventário entre o ponto inicial e o final de uma rota de produção. Este estoque não inclui o produto final já pronto para a entrega ao cliente, conhecido como estoque de produto acabado, nem o estoque de matéria-prima;
- f) O tempo de atravessamento (*Lead Time* - LT), também chamado de tempo médio de atravessamento, tempo de fluxo ou tempo de permanência provisória, é o tempo médio em uma determinada rota de trabalho entre a liberação para o trabalho até o momento em que atinge o local de estoque no fim da rota;
- g) O tempo de ciclo (*Cycle Time* - CT) é o tempo que uma etapa produtiva se utiliza para um ciclo completo de processamento, do início de um item até o início do item seguinte. O tempo de ciclo é associado de forma inversa à taxa produtiva ou *throughput*. Assim, uma estação de trabalho que produz uma peça a cada dez minutos tem o tempo de ciclo de dez minutos e o TR de  $\frac{1}{10}$  peças por minuto (seis peças por hora);
- h) A utilização de uma estação de trabalho é a fração de tempo em que uma estação não está ociosa (*idle*) por falta de partes para processamento, ou seja, é a relação entre a produção efetiva de um sistema e sua capacidade.

Quanto à forma como o fluxo é coordenado na linha, a linha de produção (ou de montagem), pode ser dividida em:

- a) Síncrona. O movimento dos trabalhos é coordenado, de forma que todas os itens se movem para a estação seguinte simultaneamente. Um exemplo é de uma montagem em que as peças passam por uma esteira e os funcionários (ou máquinas) ficam parados, realizando uma operação, de forma que todas as peças sigam para a etapa

seguinte ao mesmo tempo. Nas linhas síncronas o número de tarefas é constante e não há a necessidade de estoques de material em processo entre as estações;

- b) Assíncrona. Nestas linhas, o movimento dos trabalhos não é coordenado, de forma que os operadores ou máquinas iniciam seu processo assim que o material (ou pessoa) esteja disponível para iniciar o trabalho. As máquinas ou operadores não precisam iniciar suas atividades ao mesmo instante. Ao terminar a atividade e havendo espaço, o material segue direto para a etapa seguinte. Como os trabalhos das estações podem iniciar e terminar em momentos diferentes, a operação (o operador ou a máquina) pode ficar parada. Isso porque existem momentos em que a operação pode estar ociosa (sem tarefa disponível), ou bloqueada (sem espaço para dispor o material). Desta forma, os espaços para estoques de material em processo (conhecidos como *buffers*) acabam sendo necessários para impedir estas paradas e a perda de eficiência da linha. De acordo com estas características, uma boa parte dos sistemas de produção reais são assíncronos (DALLERY; GERSHWIN, 1992);
- c) Contínua. Quando o produto em processo não é discreto, mas sim contínuo. Não é possível no processo contínuo identificar onde termina um item e começa outro. Como exemplo, temos o processo de uma refinaria de petróleo, onde não é possível distinguir um litro de combustível do seguinte.

Com relação ao limite de tempo para a realização das estações de trabalho, as linhas assíncronas podem ainda ser subdivididas em duas outras categorias: podem estar cadenciadas (*paced*) ou não-cadenciadas (*unpaced*):

- a) Cadenciada - *paced*. Em uma linha cadenciada o tempo para a realização de uma operação é limitado. Uma vez que o tempo termina, o trabalho não pode mais ser executado, a peça segue o processo, sendo que pode estar com o trabalho incompleto;
- b) Não cadenciada - *unpaced*. Em uma linha não-cadenciada não existe limite de tempo, por isso uma operação pode ficar parada esperando a outra, ou vice-versa. As linhas assíncronas são, em sua maioria, não cadenciadas.

Ao se modelar uma linha de produção é preciso levar em consideração as características da linha e do processo. Por isso, para a elaboração do modelo a ser utilizado para a sustentação da tese envolvendo distribuições de capacidades produtivas, devem ser determinadas variáveis como o tempo de processo ou de cada estação de trabalho, a distribuição de probabilidade destes tempos, o número de estações de trabalho, se existem ou não máquinas em paralelo, se existem montagens, desmontagens, entre outras variáveis possíveis.

Dallery e Gershwin (1992) definem o problema do projeto de linha como aquele que se dedica a escolher o tamanho dos *buffers* ou os parâmetros dos recursos de forma a maximizar a performance ou minimizar os custos sujeito às restrições impostas. Para resolver este problema, torna-se necessário avaliar os resultados das medidas de performance das linhas.

Assim, as medidas de performance das linhas invariavelmente envolvem medidas relacionadas a objetivos, como:

- a) Maximização da taxa de produção da linha, aumentando o número de itens ou clientes processados por unidade de tempo;
- b) Minimização dos custos com ativos utilizados no sistema, sejam eles imobilizados, como equipamentos, maquinário veículos e instalações, ou ativos circulantes, como estoque de matéria-prima, material em processo ou produto acabado;
- c) Minimização de demais recursos utilizados no sistema produtivo, como mão-de-obra, energia, etc.
- d) Minimização dos tempos de ciclo;
- e) Minimização dos tempos de atravessamento.

A tese apresentada compara o desempenho de distribuições de capacidade em formatos diferentes, sujeitas a *mix* diversificados de produtos em linhas de produção discretas em série, com até cinco estações de trabalho. As medidas de desempenho utilizadas para esta comparação envolvem os dois primeiros itens listados acima: maximização de taxa de produção de linha (TR) e minimização de custos com ativos (WIP).

Os tempos de ciclo e atravessamento não são tratados diretamente, posto que uma relação fundamental entre CT, TH e WIP é explicada pela 'Lei de Little' (*Little's Law*), que tem este nome em homenagem a John D. C. Little, que apresentou a prova matemática para a expressão:

$$L = \lambda * W$$

Sendo,  $L$  o número médio de itens presentes em um sistema,  $\lambda$  a taxa média de chegada de itens e  $W$  o tempo médio que um item fica no sistema. Little (1992) esclarece que esta fórmula revela-se particularmente útil pois muitos métodos para a análise de sistemas de filas se produzem valores de  $L$  ou  $W$ , mas não ambos.

## 2.3 Distribuição de capacidades de linhas

Hudson, McNamara e Shaaban (2015) afirmam que a proposta de grande parte da literatura em manufatura é de investigar como melhorar ou otimizar a eficiência das linhas de produção de acordo com uma grande variedade de objetivos, muitas vezes conflitantes. Assim, por exemplo, uma determinada organização pode buscar maximizar a utilização de seus equipamentos reduzindo o tempo ocioso de máquinas, enquanto outra visa reduzir os seus estoques e garantir uma entrega mais rápida e uma terceira pretende atingir a maior taxa produtiva.

Em razão desta variedade de objetivos e somando-se a diversidades de características dentro das linhas produtivas, é possível fazer algumas distinções entre as alternativas de projeto de sistemas produtivos, quanto à distribuição de capacidades.

Uma primeira abordagem na distribuição das capacidades das estações de trabalho busca a partição ótima da carga de trabalho total nas estações, minimizando o tempo ocioso total e é conhecida como balanceamento de linha. Já outra abordagem não se preocupa com o tempo ocioso das estações não gargalo e emprega deliberadamente o uso de capacidade excedente em posições pré-determinadas, sendo denominada desbalanceamento de linha (GENIKOMSAKIS; TOURASSIS, 2008). Estas abordagens serão tratadas separadamente nas sub-seções a seguir.

### 2.3.1 Linhas balanceadas

Uma linha de montagem é composta por um conjunto  $k = 1, \dots, m$  de estações de trabalho, arranjadas de forma a realizar repetidamente as operações em cada peça. O total de trabalho necessário para o processamento de cada peça é dividido em um conjunto  $V = 1, \dots, n$  elementar de operações, nomeado tarefas ou *tasks*. As tarefas são unidades indivisíveis de trabalho e cada tarefa  $j$  é associada a um tempo de processo  $t_j$ , nomeado tempo de tarefa. Devido a limitações organizacionais e tecnológicas, as tarefas não podem ser realizadas em uma sequência arbitrária, mas estão sujeitas a limitações de precedência, as *precedence constraints*. O problema de balanceamento de linha pode ser representado por meio da determinação das tarefas e sua sequência, de forma a igualmente distribuir (ou balancear) o trabalho entre as estações visando atingir um objetivo.

O gráfico de precedência é uma das formas de apresentar estes tipos de restrições, sendo formado um nó para cada tarefa, pesos dos nós representando os tempos e arcos, refletindo as limitações de precedência. A Figura 2.4 a seguir apresenta um exemplo de precedência.

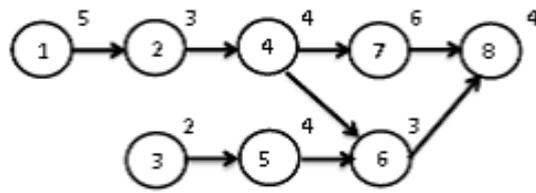


Figura 2.4: Gráfico de precedência

A viabilidade do balanceamento de linha, ou da disposição equinânime das tarefas entre as estações, deve assegurar que nenhuma relação de precedência seja violada. Assim, dado um conjunto  $S_k$  de tarefas dispostas para uma estação  $k$ , constituindo a carga de trabalho da estação, o tempo da estação é dado pelo somatório do tempo das tarefas  $t(S_k)$ :

$$t(S_k) = \sum_{j \in (S)} t_j$$

De tal forma que o tempo de ciclo  $c$  seja sempre superior aos tempos das estações e sua diferença seja o tempo ocioso ou improdutivo, *idle time* (IT):

$$IT = c - t(S_k)$$

O balanceamento de linha surge pela necessidade de aumentar a eficiência da linha pela maximização da razão entre a taxa produtiva (*Throughput* - TR) e os custos requeridos, principal objetivo dos projetistas de linha (REKIEK et al., 2002b). Assim, o clássico problema de balanceamento de linha (*Assembly Line Balancing Problem* - ALBP) é determinar as tarefas para as estações de trabalho de forma a maximizar sua eficiência, ou seja, diminuir o tempo ocioso (*idle time*).

Este problema foi primeiramente endereçado formulando o balanceamento como um problema de programação linear incluindo as possíveis combinações de atribuição de estações de trabalho (SALVESON, 1955). Mas a multiplicidade de condições de um sistema de produção real acabou abrindo espaço para uma série de classificações, assim como formas diversificadas de resolver estes problemas.

A principal categorização do ALBP o divide em duas categorias:

- a) Problema simples de balanceamento de linha de montagem - *Simple Assembly Line Balancing Problem* - SALBP;
- b) Problema geral de balanceamento de linha de montagem - *General Assembly Line Balancing Problem* - GALBP.

A maior parte das pesquisas em balanceamento de linha é concentrada no SALBP, que, como o próprio nome já leva a entender, inclui problemas bem simples. As premissas do SALBP são muito restritivas e não representam muitos dos problemas reais de produção.

A versão mais simples do SALBP é conhecida como o *bin packing problem* - BPP, cujo princípio é o de acomodar da melhor forma possível objetos unidimensionais de vários tamanhos em caixas idênticas de igual capacidade. Considerando que os tempos de duração das tarefas são fixos e deveriam ser acomodados nas caixas, que seriam os tempos de ciclo das estações de trabalho.

[Baybars \(1986\)](#) especifica as seguintes premissas para o SALBP:

- a) Todos os parâmetros inseridos no problema são conhecidos e determinísticos;
- b) As tarefas não podem ser divididas entre duas ou mais estações de trabalho;
- c) As tarefas não podem ser processadas em sequência aleatória devido a limitações tecnológicas de precedências;
- d) Todas as tarefas devem ser executadas;
- e) Todas as estações são equipadas e gerenciadas de forma a processar qualquer tarefa;
- f) Os tempos das tarefas são independentes da estação na qual estão sendo processados e das tarefas precedentes;
- g) Qualquer tarefa pode ser processada em qualquer estação;
- h) A linha é seriada;
- i) A linha é projetada para um único modelo de um único produto;

O SALBP é então subdividido para quando o tempo de ciclo da linha é dado e fixo (SALBP-1) ou quando o número de estações de trabalho é dado e fixo (SALBP-2). Assim, considerando:

- a)  $N$  - Número de tarefas;

- b)  $k$  - Número de estações;  
 c)  $t_i$  - Tempo da tarefa  $i$  (deterministicamente conhecido)  $CT$  - Tempo de ciclo da linha;  $P_i$  - Conjunto imediatamente predecessor à tarefa  $i$ ;

E utilizando alguns pesos para a alocação das estações:

$$w_{ik} = w_k \quad \forall k;$$

$$N * w_k \leq w_{k+1}$$

O SLABP-1 pode ser representado como o seguinte problema de programação inteira:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ik} * x_{ik} \longrightarrow \min_{x_{ik}}$$

Sujeito a, para cada tarefa, i.e  $\forall i = 1, \dots, N$ :

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1$$

E para cada estação, i.e  $\forall k = 1, \dots, N$ :

$$\sum_{i=1}^N t_i x_{ik} \leq C$$

$$x_{i_2 k_1} \leq \sum_{k=1}^{k_1} x_{i_1 k} \quad \forall i_2, k = 1, \dots, N \quad e \quad i_1 \in P_{i_2}$$

$$x_{ik} \in 0, 1$$

Considerando que  $x_{ik}$  é igual a se a tarefa  $i$  é associada à estação  $k$ , de outra forma  $x_{ik}$  é igual a zero.

Uma outra forma de categorizar os ALBP (BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2008) distingue

os sistemas produtivos de acordo com:

- a) Número de itens produzidos na linha de produção, como simples, mista ou multi produtos;
- b) Forma de controle da linha, como cadenciadas, não cadenciadas assíncronas, não cadenciadas síncronas;
- c) Tipo de instalação, como instalações de primeiro uso ou reconfiguradas;
- d) Nível de automação, como manual ou automática.

Devido a esta ampla diversidade de condições de linha, existem vários outros tipos de classificação dos ALBP (SCHOLL; BECKER, 2006; REKIEK et al., 2002b; BAYBARS, 1986; BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2008). Por exemplo, já foi mencionado que uma considerável parte das linhas de produção reais são não-cadenciadas. Então, para caracterizar este tipo de linha, são excluídas a restrição de tempo de ciclo comum entre as estações de trabalho (que caracteriza as linhas cadenciadas) e, usando estoques de material em processo temos um problema de balanceamento mais específico, com a decisão adicional de dimensionamento e posicionamento destes estoques (SUHAIL, 1983; BUZACOTT, 1968; BAKER; POWELL; PYKE, 1990; HILLIER; SO, 1991; HILLIER; SO, 1993; DOLGUI et al., 2002).

Assim existirão outras condições incrementadas, como:

- a) Diferentes tipos de produtos na mesma linha, com diferentes tempos de ciclo para cada produto, criando problemas de sequenciamento;
- b) Produtos de modelos mistos ou múltiplos, com diferentes peças sendo produzidas em cada linha. Nas linhas de modelos múltiplos peças diferentes são produzidas em lotes enquanto nas linhas mistas é possível produzir partes diferentes de em sequência aleatória. Então o tamanho de lote entra como restrição nova no problema;
- c) Alta variabilidade dos tempos de processo, mudando o tempo de cada processo de determinístico para estocástico;
- d) Mudando o arranjo produtivo de uma linha em série para formas em "U", de forma a permitir o trabalho simultâneo;
- e) Outros arranjos produtivos mais complexos, com linhas em paralelo ou atividades em paralelo;
- f) Processos alternativos, ou seja, o item pode ser processado por um equipamento ou recurso diferente, com tempos diferentes de processamento;

g) Restrição de posição relativa, linhas duplas, estação com restrição de atribuição, etc.

Todas estas condições específicas que foram sendo agregadas tinham a intenção de melhorar o entendimento do ALBP e apresentar alternativas mais próximas das condições reais.

Apesar do imenso esforço acadêmico, uma proporção ainda muito baixa das publicações sobre o balanceamento de linha ainda envolve problemas de empresas reais. [Boysen, Fliedner e Scholl \(2008\)](#) apresentam um levantamento que envolve mais de 312 diferentes trabalhos publicados, dos quais somente quinze tiveram relação com sistemas reais de produção. Esta disparidade revela uma enorme distância entre os modelos e as configurações de sistemas produtivos do mundo real.

A tese defendida inclui em sua comparação as distribuições de capacidade balanceadas, por meio de um modelo que verifica o desempenho tanto da linha balanceada, quanto de algumas configurações desbalanceadas, com e sem *mix* diversificados de produtos. Desta forma, inclui as condições de linhas mistas ou de produtos múltiplos, mencionadas acima e tão pouco estudadas na literatura. Adicionalmente, é apresentada a aplicação do modelo em um linha real de produção, de forma a diminuir esta distância entre os modelos acadêmicos e os sistemas produtivos reais e prover uma ferramenta para outras aplicações reais futuras.

### 2.3.2 Linhas desbalanceadas

A operação de uma linha perfeitamente balanceada, onde os *buffers* são desnecessários, é específica e, algumas vezes até considerada como rara. Ainda assim, quando comparada a pesquisa de acordo com o tipo de linha, uma quantidade bem menor é direcionada para as linhas desbalanceadas ([HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015](#); [POWELL; PYKE, 1997](#)). E este não é um tema novo no meio acadêmico. A pesquisa sobre linhas desbalanceadas começa na década de 1960, alguns anos após a publicação dos primeiros artigos sobre balanceamento de linha ([MURRELL, 1961](#); [DAVIS, 1965](#)). E cerca de três décadas depois ainda se comentava que esta carência de pesquisa sobre este tema na literatura seria devida à dificuldade de analisar linhas com muitos graus de liberdade ou linhas longas e às características dos modelos construídos, que não eram preparados para comparações com estruturas de dados de linhas reais de produção ([POWELL, 1994](#)).

O atendimento da linha perfeitamente balanceada é a condição ideal. Mas em muitos casos esta condição ideal é bem difícil de ser atendida. A linha desbalanceada é, obviamente, aquela que não está perfeitamente balanceada. O desbalanceamento de uma linha pode

se dar por diferentes causas. Assim, de forma similar aos problemas de balanceamento de linha, abordagens diversas podem ser utilizadas para atingir diferentes objetivos (HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015). O desbalanceamento pode ser devido a:

- a) Diferentes tempos médios de processo (TM);
- b) Diferentes coeficientes de variação dos tempos de processo (CV);
- c) Combinação de diferentes tempos médios de processo e coeficiente de variação dos tempos de processo;
- d) Linhas de produção e estações de trabalho não confiáveis;
- e) Posicionamento e dimensão dos *buffers*;

Estudos mais recentes reportaram que, em determinadas condições, existem linhas que apresentam uma melhor performance em linhas desbalanceadas. Estes resultados melhores de performance se dão tanto no que se refere à taxa de produção (*throughput* - TR), quanto ao nível de estoque em processo (*work in process* - WIP) e embasam as premissas utilizadas pela tese.

Powell e Pyke (1997), por exemplo, já apontavam previamente que sistemas desbalanceados podem obter maior produtividade (*throughput* ou número de partes terminadas por unidade de tempo) do que alguns sistemas desbalanceados, de forma a fazer com que os projetistas de linha possam deliberadamente criar linhas desbalanceadas.

Atwater e Chakravorty (1994) estudaram a possibilidade da capacidade protetiva servir como recurso para reduzir os tempos de atravessamento, principalmente os relacionados aos estoques.

Uma das principais contribuições nesta área foi batizada de 'efeito tigela' ou *bowl phenomenon* por conta do formato dos gráficos de tempo de processo. O TR ótimo seria atingido com estações de trabalho mais lentas no começo e no fim da linha e mais velozes no centro, lembrando o formato de uma tigela ou *bowl shape*.

Hillier e Boling (1966) analisaram linhas de até quatro estações com distribuição de tempo exponencial entre as tarefas, resultando um ganho na taxa produtiva - TR quando comparada à linha balanceada. O resultado foi ratificado com investigações de até seis estações com distribuição de tempo Erlang e melhorias da TR (HILLIER; BOLING, 1977; HILLIER; BOLING, 1979) e com simulações de até doze estações e distribuições de tempo de processo exponencial, normal e lognormal (EL-RAYAH, 1979).

Hudson, McNamara e Shaaban (2015) apontam que Yamazaki, Sakasegawa e Shanthikumar (1992) propuseram uma regra que locava as estações de pior desempenho (menor taxa produtiva - TR ou maior tempo de ciclo - CT) no final de cada linha com outras estações colocadas em qualquer arranjo, além de uma segunda regra que distribuía as estações do meio em um formato de tigela. Bons resultados também foram encontrados para o *bowl shape*. Já Pike e Martinj (1994) usaram distribuições de frequência assimétricas do tempo de ciclo com um *buffer* para o gargalo em linhas com mais de 30 estações e trabalho e também encontraram suporte para a melhor performance do *bowl shape*. Os resultados foram também confirmados com linhas de nove estações, distribuição de CT exponencial e *buffers* finitos ou inexistentes.

A robustez da configuração em *bowl shape* foi confirmada para linhas mantendo a melhoria em taxa produtiva - TR até em altos graus de desbalanceamento, de até 10 % de diferença entre tempo médio das estações (PIKE; MARTINJ, 1994; HILLIER; SO, 1996).

A melhoria de performance utilizando-se de desbalanceamento de capacidade pelos tempos de ciclo médio também foi investigada por Shaaban e McNamara (2009b), que encontraram uma melhor eficiência de máquinas, com menos tempo ocioso utilizando-se a configuração em *bowl*. Contudo, quando observado o estoque em processo (WIP), encontram uma performance melhor ao distribuir as estações de trabalho da mais lenta para a mais rápida seguindo a direção do fluxo de produtos.

Fry e Russell (1993) testam, por meio de simulações seis diferentes tipos de configuração de distribuição de capacidade: balanceada, *bowl*, em 'V', linear, passo e segmentado, conforme ilustrado na Figura 2.5.

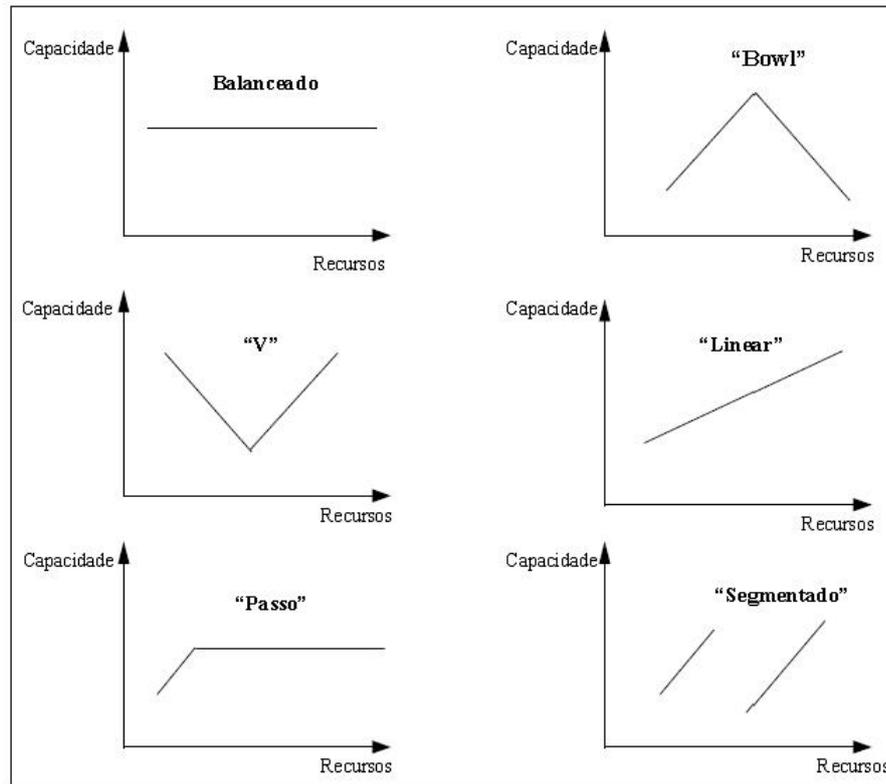


Figura 2.5: Critérios de alocação de capacidade (FRY; RUSSELL, 1993)

Os resultados obtidos indicaram que o grau de variabilidade dos processos e o tamanho da capacidade em excesso dos não-gargalos é determinante para indicar qual a distribuição de melhor desempenho. Assim, em linhas de produção com uma pequena quantidade de capacidade em excesso (inferiores a 10%), as configurações desbalanceadas teriam resultados iguais ou melhores do que a configuração balanceada, em termos de TR e WIP. Porém, quando a capacidade da linha é bem superior à demanda do mercado (superiores a 20%), a configuração balanceada se mostrava mais efetiva.

Por conta desta comparação, também envolvendo valores de TR e WIP, assim como pelos resultados encontrados, que as distribuições utilizadas por Fry e Russell (1993) são escolhidas para fazer parte desta tese, agora incluindo a utilização de *mix* diversificados de produtos.

Hudson, McNamara e Shaaban (2015) igualmente apontam e resumem que, embora melhorias tenham sido encontradas para algumas das configurações em formato de *bowl*, outros padrões de desbalanceamento também mostraram performance igual ou melhor do que linhas balanceadas, especialmente quando o grau de desbalanceamento era aumentado. A superioridade do formato *bowl* desaparecia quando o grau de desbalanceamento era aumentado e para tamanhos de *buffers* altos, sendo que os piores resultados em ter-

mos de tempo ocioso de máquina foram encontrados quando as estações de trabalho mais velozes eram posicionadas ao final da linha de produção.

*In conclusion, most of the results show that placing the faster stations in the middle of the line gives the best results. This is explained by the fact that the blocking and starving that occurs as a result of the slower stations has the most effect on adjacent stations, and therefore, placing them at the extremities of the line only affects one station either upstream or downstream.* (HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015)

Outra contribuição foi feita com a Teoria das Restrições (ou *Theory of Constraints* - TOC) (GOLDRATT, 1981; GOLDRATT; COX, 1984; GUPTA; SNYDER, 2009). A abordagem considera que toda linha de produção tem, ou deveria ter, pelo menos um gargalo ou restrição. Desta forma propõe-se um conjunto específico de regras para gerenciar os gargalos e otimizar o fluxo de material: o tambor-pulmão-corda, ou *drum-buffer-rope*. Esta abordagem ajudou a difundir a proposta de linhas desbalanceadas em determinadas condições e novos estudos foram surgindo comparando o desempenho de linhas sob configurações diversas, como linhas assíncronas balanceadas versus desbalanceadas e *Just In Time* - JIT (CHAKRAVORTY; ATWATER, 1996; SLOAN, 2001; KIM; COX; MABIN, 2010).

É importante mencionar que os princípios do *Just In Time* e *kanban* também consideram que o tempo ocioso das máquinas ou estações não são o problema principal de uma linha de montagem. Garantindo que o fluxo de material seja constante, o balanceamento perfeito da linha não seria essencial. Os gerentes japoneses, por exemplo, permitiriam doze por cento a dezoito por cento de capacidade adicional nos seus sistemas de produção para garantir o *kanban* (KRAJEWSKI et al., 1987).

Filho e Uzsoy (2014) também trataram as configurações desbalanceadas, considerando processos enxutos e pequenas, mas contínuas, melhorias nos recursos não-gargalo. Estas melhorias conduzem a um melhor fluxo de material no gargalo e reduzem a possibilidade de parada por falta de material (*starvation*). Desta forma, são encontrados resultados melhores no tempo de ciclo (CT) e redução da variabilidade do processo.

A maior parte dos estudos foi feita em cima de modelos de linha com poucas estações de trabalho, mas existem trabalhos também avaliando linhas mais longas. Alguns estudos focam na alocação e dimensão dos *buffers* como forma de desbalanceamento, enquanto outros trabalham avaliando o desbalanceamento por diferentes tempos médio de processo, outros a combinação dos dois efeitos. Há também trabalhos focados em linhas desbalanceadas e em capacidade protetiva. A Tabela 2.6 sintetiza alguns importantes trabalhos com o tamanho de linha (N), o tipo de distribuição de probabilidade utilizada no modelo e a abordagem para resolução.

Tabela 2.6: Características de linhas simuladas

Trabalho	Estações (N)	Distribuição	Modelo
Chow (1987)	3	Normal	Analítico
Hillier e Boling (1966)	3	Erlang	Analítico
Hillier e Boling (1977)	7	Erlang	Simulação
El-Rayah (1979)	até 12	Exp, Nor, LogNor	Simulação
Pike e Martinj (1994)	30	Assim.	Simulação
Hillier e So (1995)	9	Exponencial	Simulação
Shaaban e Hudson (2009)	5 e 8	Exponencial	Simulação
Carnall e Wild (1976)	4 - 10	-	Simulação
Wyche e Wild (1977)	3,4 e 12	-	Simulação
Lau (1992)	até 8	Lognormal	Simulação
Shaaban e McNamara (2009a)	5, 8 e 10	-	Simulação
Rao (1975)	2 - 3	Erlang	Anal. e Sim.
Muth e Alkaff (1987)	3	Exponencial	Analítico
Hutchinson, Villalobos e Beruvides (1997)	5	Normal	Anal. e Sim.
Shaaban e McNamara (2009c)	5 e 8	Weibull	Simulação
Patti e Watson (2010)	6	-	Simulação
Kadipasaoglu et al. (2000)	4	Lognormal	Simulação
Jr e III (2002)	4	Lognormal	Anal. e Sim.
Freeman (1964)	3	Exponencial	Analítico
Hillier (2013)	3 e 4	Exponencial	Anal. e Sim.
Castellucci e Costa (2015)	3 - 7	Normal	Simulação
Chakravorty e Atwater (1996)	6	Normal	Simulação
Chiang, Urban e Xu (2012)	3 - 27	Normal	Simulação
Craighead, Patterson e Fredendall (2001)	5	Lognormal	Simulação
Dolgui et al. (2002)	4	-	Anal. e Sim.
Powell e Pyke (1997)	2 - 4	Normal	Simulação
Shaaban, McNamara e Hudson (2014)	5 - 10	Right Shift Weibull	Simulação
Smunt e Perkins (1989)	3 e 8	Normal	Anal. e Sim.

Em relação à metodologia, as pesquisas com linhas menores normalmente utilizam-se de modelos matemáticos analíticos de otimização. Para os modelos com linhas com mais de 4 estações de trabalho, a simulação e desenvolvimento de algoritmos prevalecem, dada a dificuldade de se trabalhar com modelos matemáticos para situações mais complexas.

E é na segunda metade da década de 1990 que estão os principais trabalhos envolvendo, tanto a comparação do desempenho de linhas de produção desbalanceadas, quanto si-

tuações que favorecem o uso das linhas com capacidade balanceada (CHAKRAVORTY; ATWATER, 1996; CRAIGHEAD; PATTERSON; FREDENDALL, 2001; LIU; LIN, 1994; SOUZA; PIRES, 1999).

Desde então, de acordo com Hudson, McNamara e Shaaban (2015), muita pesquisa tem sido feita, mas muita incerteza ainda existe envolvendo os procedimentos de projeto de linha desbalanceadas.

Assim, muito pouco também tem sido produzido envolvendo a modelagem de linhas reais de produção, nos trabalhos sobre a distribuição de capacidades produtivas, independente de serem configurações balanceadas ou desbalanceadas (PIKE; MARTINJ, 1994).

### 2.3.3 Indicadores de balanceamento

Junto com os estudos sobre distribuição de capacidade que se utilizavam de técnicas de balanceamento de linha para o atingimento de objetivos de desempenho, surgem, de forma natural, indicadores para avaliar a efetividade de cada método de balanceamento.

Entre as medidas de balanceamento já existentes (BAYBARS, 1986; EREL; SARIN, 1998; DRISCOLL; THILAKAWARDANA, 2001; SCHOLL; BECKER, 2006), é possível identificar, quanto à sua natureza, dois grupos distintos:

- a) Indicadores para avaliar a qualidade da solução apresentada para o balanceamento, ou sua eficácia. São caracterizados como *assessment measurements*;
- b) Indicadores para avaliar o grau de dificuldade do sistema a ser balanceado, as medições de dificuldade. Estes são utilizados para avaliar a eficácia do método de balanceamento, categorizando o algoritmo de acordo com o nível de dificuldade.

Os indicadores de dificuldade são utilizados para avaliar os métodos e algoritmos para o balanceamento de capacidade e não serão utilizados nesta tese. Já os indicadores de eficácia servem para indicar o quão balanceadas estão as linhas de produção após a resolução do problema de balanceamento. Nesta tese servirão para classificar as diferentes configurações de capacidade a serem testadas com relação ao desempenho, antes e após a introdução de *mix* diversificados de produtos.

A Eficiência da Linha -  $LE$ , por exemplo, é uma medida de percentagem de utilização da linha, onde  $CT$  é o tempo de ciclo,  $m$  é o número de estações e  $S_i$  é o tempo para execução de tarefas em cada estação.

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{m * CT} * 100$$

A eficiência de balanceamento, ou *Balance Efficiency* - BE é uma medida do quão niveladamente o trabalho está distribuído entre as estações de trabalho. Na fórmula,  $t_{av}$  representa o tempo médio de processo das estações de trabalho (*average time*) em toda a linha. No caso do balanceamento, a meta seria obter  $BE=100\%$ , correspondendo à carga idêntica de trabalho entre todas as estações.

$$BE = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^m |t(S_i) - t_{av}|}{m * t_{av}} \right] * 100$$

O índice de suavidade, ou *Smoothness Index* - SI é uma medida de relativa suavidade de uma dada linha, normalmente utilizada depois de balanceada. Nos problemas de balanceamento, a meta é obter  $SI=0$ , indicando um balanceamento perfeito. Alguns autores argumentam que  $SI$ , sendo adimensional, é influenciada por valores individuais do problema, o que faria a comparação entre problemas sem significado (DRISCOLL; THILAKAWARDANA, 2001).

$$SI = \left[ \sum_{i=1}^m (CT - t(S_i))^2 \right]^{-0,5} * 100$$

Como a capacidade (*throughput*) de uma estação de trabalho pode ser obtida pelo inverso do CT, estas medidas também funcionam ao reverso; quanto maior o desbalanceamento, menor o  $BE$  e  $SI$ .

Estas medidas estão presentes nos modelos desenvolvidos para a sustentação da tese na forma de fatores de entrada a serem testados nos experimentos envolvendo as diferentes configurações. Como o BE e o SI avaliam a mesma característica das configurações, foi escolhido o BE para compor o experimento utilizado na tese.

## 2.4 Mix de produção

No capítulo anterior já foi mencionada a importância das linhas de produção no contexto industrial e como é complexo o seu projeto e gestão para a obtenção de um melhor desempenho na empresa.

Porém a realidade das linhas de produção nem sempre foi essa. A linha de produção é um dos elementos mais associados à revolução industrial e se propagou rapidamente pelas empresas, até mesmo de prestação de serviços, por conduzirem a saltos de produtividade por meio de princípios simples. O emprego da divisão do trabalho e a busca pelo tempo ideal de produção proporcionava produtos com melhor qualidade e melhores taxas produtivas.

De acordo com [Correa e Correa \(2004\)](#), a linha de montagem móvel de Ford ficou famosa porque agregou princípios da administração científica, como divisão do trabalho, escolha do trabalhador certo, intercambiabilidade, entre outros, que repercutiram com bastante sucesso.

Esta realidade de linha produtiva era também associada à pouca diversidade de produtos, tendo ficado marcada pela frase atribuída a Henry Ford de que poderia ser escolhida qualquer cor para o Ford Modelo-T, contanto que fosse preta. A posterior pressão por produtos diversificados, contudo, trouxe um novo cenário e novas condições para as linhas de produção. O consumidor não estava mais satisfeito com um único tipo, padronizado e sem diferenciação. As empresas que apresentassem produtos diferenciados ganhavam competitividade, como aconteceu com a linha da General Motors, de Sloan.

Se a estratégia de Ford teve grande sucesso no início do século, quando um veículo semi-utilitário como o modelo T atendeu a necessidade de pequenos proprietários rurais muito sensíveis a preço, o ambiente norte-americano de meados dos anos 1920, mais sofisticado, favoreceu a política de flexibilização de linha de produtos de Alfred Sloan. ([CORREA; CORREA, 2004](#))

*Originally, assembly lines were developed for a cost efficient mass-production of standardized products, designed to exploit a high especialization of labour and the associated learning effects. Since the times of Henry Ford and the famous model-T, however, products requirement and thereby the requirements of production systems have changed dramatically. In order to respond to diversified costumer needs, companies have to allow for an individualization of their products. For example, German car manufacturer BMW offers a catalogue of optional features which, theoretically, results in  $10^{32}$  different models. ([BOYSEN; FLIEDNER; SCHOLL, 2008](#)).*

A flexibilidade aparece, portanto, como um possível elemento de competitividade. Para alguns mercados, não basta oferecer preços baixos, é preciso se adaptar. [Slack et al. \(2002\)](#) apresentam a flexibilidade nas linhas produtivas de quatro diferentes formas:

- a) Flexibilidade de produto-serviço, caracterizada por produtos e serviços diferentes;
- b) Flexibilidade de composto (*mix*), caracterizada pela ampla variedade ou composto de produtos e serviços;
- c) Flexibilidade de volume, caracterizada pelas quantidades ou volumes diferentes de produtos e serviços;

- d) Flexibilidade de entrega, caracterizada pelos tempos de entrega diferentes.

[Gupta e Goyal \(1989\)](#) já apresentam a classificação da flexibilidade dos sistemas produtivos com um leque ainda mais diversificado de características,:

- a) Flexibilidade de equipamentos - a habilidade de repor peças desgastadas ou quebradas, trocar ferramentas e montar os dispositivos de conserto sem a necessidade de longos tempos parados;
- b) Flexibilidade de processo - a habilidade de variar os passos necessários para completar uma tarefa;
- c) Flexibilidade de produto: a habilidade de mudar de um produto para um novo dentro de um determinado espectro de partes, economicamente e rapidamente
- d) Flexibilidade de roteamento - a habilidade de variar o roteiro no qual os produtos passam pelas máquinas sem interromper a produção;
- e) Flexibilidade de volume - a habilidade de operar o sistema de forma lucrativa sob diferentes volumes produtivos;
- f) Flexibilidade de expansão - a habilidade de construir e montar um novo sistema produtivo, de forma a operar sob diferentes volumes;
- g) Flexibilidade de sequência de processo - a habilidade de intercambiar a ordem de diversas operações para cada tipo de produto;
- h) Flexibilidade de produção - a habilidade de rapidamente e economicamente aumentar a variedade de partes para qualquer produto produzido pelo sistema.

Esta pressão por sistemas produtivos mais flexíveis para entregar itens mais diversificados pelos clientes em algumas famílias de produtos foi se ampliando e ganhando força, revelando conflitos que se desdobravam para as linhas de produção. Os conflitos existiam na medida em que as linhas, anteriormente desenhadas de forma dedicada e específica para um determinado produto, precisavam ser alteradas para o processamento de novos itens.

De acordo com [Pine, Victor e Boynton \(1993\)](#), até a difusão da adoção das políticas de melhoria contínua, dicotomias do tipo 'e/ou' ditavam maior parte das decisões gerenciais. Uma empresa poderia perseguir uma estratégia de prover grandes quantidades de produtos ou serviços personalizados com baixo custo, ou poderia decidir em produzir itens customizados ou altamente diferenciados em pequenos volumes, com alto custo.

[Gupta e Goyal \(1989\)](#) destacam que formas convencionais de manufatura têm costumeiramente se baseado em dois tipos de equipamento. O primeiro, de maquinaria dedicada

como as linhas de transferência, é mais adequado para a produção em massa de um único tipo de produto. Este processo permite baixos custos unitários, mas também inibe a flexibilidade. O segundo tipo de equipamento, de máquinas ferramenta gerais não integradas, seria mais adequado para lotes de produção muito pequenos constituídos de muitos itens diferentes. Os custos unitários tendem a ser maiores, mas a flexibilidade do processo pode acomodar mudanças de projeto, flutuações de demanda e mudanças no *mix* de produtos.

O modelo utilizado para a tese pode ser aplicado tanto às maquinarias de linha dedicada, que são modificadas para atender produtos diferentes, quanto às máquinas ferramenta, que oferecem mais flexibilidade de produto. Isso porque, atualmente, conceitos como personalização em massa são propagados de forma a unir características de alta produtividade da linha de produção agregando às necessidades de diversificação solicitadas pelo mercado.

[Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi \(2009\)](#) argumentam que a personalização em massa tem evoluído a partir de dois paradigmas predominantes do século 20, produção em massa e produção artesanal. A produção em massa envolve a produção eficiente de uma pequena variedade de bens. A produção artesanal, por outro lado, envolve trabalhadores altamente capacitados e flexíveis.

A personalização em massa e o conceito de sistemas flexíveis de manufatura, os FMS - *Flexible Manufacturing Systems* vêm ganhando força de forma similar pela necessidade de atender em grande volume clientes mais diversificados.

[Mandelbaum e Buzacott \(1990\)](#) apresentam a flexibilidade como a qualidade de um sistema que o habilita a responder efetivamente a mudanças, tendo recentemente se tornado extremamente importante nos sistemas flexíveis de manufatura (*Flexible Manufacturing System* - FMS)

Assim, o *mix* de produtos, que é a representação da quantidade de itens de cada tipo de será produzida em um processo ([SLACK et al., 2002](#)), ganha relevância no projeto e especificação das linhas de produção. Isso acontece na medida em que o *mix* interfere diretamente em características que serão necessárias para a linha, sendo associado a diversos problemas que precisam ser resolvidos para a otimização do desempenho do negócio.

[Becker e Scholl \(2006\)](#) consideram que as linhas de produção mistas (*mixed-model*) produzem diversos modelos ou versões de um produto padronizado em sequências intercaladas. Os modelos podem ser diferentes com relação a tamanho, cor, material utilizado ou equipamento, de tal forma que a sua produção requer diferentes tarefas, tempos de tarefas e/ou relações de precedência. Como consequência, afirmam que encontrar a configuração na qual as cargas nas estações tem o mesmo tempo por estação e passam pelos mesmos

equipamentos é quase impossível.

A tese apresentada visa, justamente, reduzir este problema, encontrando as configurações que melhor atendem estas linhas de produção ditas mistas.

Dentro da engenharia de produção, o *mix* de produtos, ou *product mix* é mais conhecido pelo problema que busca encontrar a quantidade ideal de produtos a serem processados em um sistema produtivo com o objetivo de maximizar a sua lucratividade. É o chamado problema do *mix* de produtos, ou *product mix problem*. Segundo [Chaharsooghi e Jafari \(2007\)](#), o *product mix problem* determina os tipos de produtos e suas correspondentes quantidades que podem ser produzidas, visando a maximização do lucro.

A questão central do problema do *mix* de produtos é, desta maneira, determinar qual a composição produtiva economicamente mais vantajosa para a empresa. Apesar de parecer, à primeira vista, um problema trivial, têm surgido diversas abordagens para resolução, encontrando resultados algumas vezes conflitantes ([CORBETTNETO, 1997](#); [CHAHARSOOGHI; JAFARI, 2007](#)).

A customização, por meio da oferta de *mix* de produtos mais variados e adequados ao gosto dos clientes, traz enormes vantagens para a oferta aos consumidores, como mais apelo para as vendas, possibilidade de penetração em novos mercados, percepção de exclusividade pelo cliente e diferenciação de preços. Por outro lado, agrega novas dificuldades, especialmente para o setor produtivo e logístico. Por meio do modelo desenvolvido para a tese é possível perceber este impacto que o desempenho do sistema recebe, na maior parte das vezes negativo, com a introdução do *mix* de produtos.

O sequenciamento dos produtos é um dos problemas de grande complexidade dentro da área de programação, planejamento e controle da produção. Como cada item do *mix* possui uma taxa de utilização diferente dos centros de trabalho, é preciso resolver este problema e coordenar as atividades para um melhor fluxo. Este planejamento precisa levar em consideração também o tempo necessário para serem permutados os itens na linha (o tempo de *set up*), possíveis limitações no ordenamento e o prazo de entrega prometido de cada cliente. Mesmo sendo um problema relevante, devido à complexidade já inerente ao problema original da tese, o problema do sequenciamento não é inserido no modelo para a tese.

A diversificação dos produtos também traz elementos complicadores para a gestão dos estoques. Isso porque a variabilidade da demanda aumenta à medida que os itens são desagregados. Assim, a variabilidade da demanda dos itens separadamente é maior, provocando um aumento da necessidade de estoques. É muito mais fácil ter o carro para entregar ao cliente se só existir uma cor, a preta, por exemplo, do que precisar manter

um estoque para uma ampla variedade de cores.

De acordo com [Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi \(2009\)](#), muitos produtos vêm com uma grande variedade de opções, estilos, cores e formas. Por exemplo, um carro pode vir em cinco estilos, dez diferentes cores externas e com transmissão automática ou manual, num total de milhares de configurações. A dificuldade está no fato de que os distribuidores e varejistas precisam estocar muitas das diversas combinações e configurações dos produtos. Esta proliferação de linha de produto torna difícil prever a demanda do cliente para um modelo específico, forçando os varejistas e distribuidores a manter estoques elevados.

Ainda de acordo com [Simchi-Levi, Kaminsky e Simchi-Levi \(2009\)](#), as tendências de uso da diversificação para agregar valor ao cliente nas empresas incluem:

- a) Especialização na oferta de um tipo de produto. Os exemplos incluem empresas tais como a Starbucks ou Subway;
- b) Grandes lojas que permitem comprar tudo em apenas um lugar para uma grande variedade de produtos. Os exemplos incluem a Wal-Mart e Kmart;
- c) Grandes lojas que se especializam em uma área de produtos, como a Centauro e a Home Depot.

Como o problema do efeito do *mix* de produtos nos volumes de estoques pode ser analisado de forma totalmente independente do problema desta tese, o modelo empregado deve considerar o estoque de material em processo como único para todo o *mix* de produtos.

Nos setores produtivos das empresas, as características dos equipamentos e processos vêm se apropriando das novas tecnologias para tornarem-se mais flexíveis e dinâmicas. Ainda assim, a pressão por produtos mais diversificados tende a continuar crescendo, demandando mais estudos sobre os efeitos desta diversidade, como mensurá-la e que alternativas para tratar os seus efeitos.

Então como se relaciona esta diversidade do *mix* de produção com o problema do balanceamento e desbalanceamento de capacidade? De que forma a introdução de novos itens ao *mix* produtivo interfere na distribuição das capacidades e no balanceamento do fluxo? As respostas a estas questões fornecidas pela tese devem servir para mediar conflitos muitas vezes existentes entre o setor de desenvolvimento de produtos e o setor produtivo em si, ao mesmo tempo em que oferecem alternativas para minimizar os efeitos dos *mix* propostos.

### 2.4.1 Mix e as capacidades produtivas

O problema do *mix* de produção naturalmente deve surgir durante a modelagem de capacidade de linhas de produção reais que não sejam dedicadas a um único tipo e modelo de produto. Como já tratado em capítulo anterior, boa parte da pesquisa atual é feita em modelos de linhas dedicadas.

Boysen, Fliedner e Scholl (2008), em uma revisão da literatura sobre o problema do balanceamento, apontam que os modelos que envolvem o mix o fazem por meio de um atributo que distingue três configurações: a mista (*mixed-model line*), a múltipla (*multi-model line*) e a dedicada (*single product*). As linhas com atributo de linha mista representam aquelas linhas nas quais vários modelos são manufaturados no mesmo sistema de produção, com processos de produção similares o suficiente para considerar que os tempos de *set up* são inexistentes ou desprezíveis. As linhas múltiplas, por sua vez, representam aquelas nas quais diferentes produtos são manufaturados em lotes. Para qualquer outro lote ser processado é necessário um *set up*, que consome tempo e recursos. Já as dedicadas representam aqueles grupos de linhas onde só um produto é processado. Para a tese apresentada, o modelo proposto aborda somente as linhas mistas e dedicadas, por não estar desenhado para incluir os tempos de *set up* entre as variáveis de controle.

Assim, o que se encontra amplamente na pesquisa acadêmica sobre balanceamento ou desbalanceamento de linhas de produção é a escolha pela análise do sistema produtivo como se fosse dedicado exclusivamente a um item. Quando o problema do mix é tratado, tornam-se mais importantes as considerações referentes ao sequenciamento dos produtos e à homogeneidade entre os gráficos de precedência.

Outra abordagem utilizada é a de refazer o balanceamento para cada novo produto que entra na programação, alterando novamente as configurações de linhas. Estes modelos são designados problemas de balanceamento de linha de modelo misto, ou *mixed-model assembly line balancing problem - MALBP*.

De acordo com Becker e Scholl (2006), a instalação de uma linha de montagem é uma decisão de longo prazo e usualmente requer altos investimentos de capital. Consequentemente, é importante que tal sistema seja projetado e balanceado de forma que funcione da forma mais eficiente possível. Além de balancear um novo sistema, um sistema em operação precisa ser rebalanceado periodicamente ou depois de mudanças no processo de produção ou quando a programação de produção for iniciada.

Os autores ainda destacam que, analogamente ao problema simples de balanceamento de linha, os MALBP consistem em encontrar o número de estações e tempo de ciclo, assim como o balanceamento de linha, de tal forma que um objetivo orientado a custo

ou capacidade seja otimizado. A modelagem e resolução dos MALBP envolvem duas abordagens básicas: reduzir a problemas de modelagens de linhas dedicadas ou fazer o balanceamento horizontal em um contexto de linha mista.

O balanceamento horizontal ocorre porque, em quaisquer casos onde as restrições de tempo de ciclo são formulada em base agregada ou com médias, ineficiências consideráveis devem ocorrer com a linha em operação, causadas por uma sobrecarga de trabalho ou por tempo ocioso. Assim, a fim de reduzir estes desbalanceamentos horizontais, outros objetivos secundários seriam propostos.

Desta forma, os modelos acabam deixando um espaço aberto quando tentam representar as linhas produtivas reais. Afinal, a soma de distribuições de probabilidade de tempos de processo diferentes pode não produzir sequer outra distribuição com as mesmas características. A união de duas distribuições de probabilidade normais com média e desvio padrão distintos podem não resultar em outra distribuição normal de probabilidade. Então faz-se mister uma análise mais aprofundada e específica sobre o *mix* de produção no balanceamento de linha.

## 2.5 Teoria das Restrições

Uma linha de pesquisa que também se envolveu com a os modelos de distribuição de capacidades produtivas de linhas de produção e que, por isso, fará parte do modelo empregado pela tese, foi a teoria das restrições. Também conhecida pela sigla TOC, da abreviação de *theory of constraints*, a teoria das restrições surgiu a partir do desenvolvimento, pelo físico israelense Elyahu Goldratt, de um sistema para a gestão da produção e de materiais, o OPT (*optmized production technology*). Este *software* foi aplicado comercialmente e acabou se mostrando muito eficiente quando comparado aos MRPs - *Material Requirements Planning* comercializados na época. Isso porque sua estrutura operacional trabalhava com lógicas simples, estruturadas para equipamentos gargalo e não gargalo, e não demandava tempo computacional para o desdobramento dos planos em todos os níveis, como fazia o MRP.

A comercialização deste *software* deu a Goldratt a oportunidade de apresentar a teoria em escala comercial e testar seu modelo em diferentes organizações. Estas experiências levaram à extrapolação da aplicação da TOC para além da gestão da produção, passando pela contabilidade, *marketing*, gestão de pessoas, projetos, estratégia, entre outras áreas (GOLDRATT, 1996).

O princípio básico da TOC é que as empresas são como sistemas e que, de forma análoga a correntes, seu desempenho é limitado pelo desempenho de seu elemento mais fraco. Assim,

em uma unidade produtiva, sempre haverá um recurso com restrição de capacidade, um gargalo, que limitará o desempenho do processo. A forma mais simples de gerir um sistema, portanto, seria por meio da gestão de sua restrição.

As restrições são definidas por [Goldratt e Cox \(1984\)](#) como qualquer elemento que limite a empresa a atingir seu objetivo. Consideram que objetivo da empresa deve ser determinado pelos seus acionistas, já que podem existir organizações beneficentes, empresas públicas, organizações não governamentais, etc. Contudo, por efeito de simplificação, o objetivo da empresa estaria sendo representado pela maximização de seu resultado financeiro; o lucro ou o retorno de investimento. Desta forma, seria possível afirmar que todas as empresas, observadas por esta ótica, teriam ao menos uma restrição, caso contrário o lucro seria infinito.

### 2.5.1 TOC e linhas produtivas

As restrições, segundo [Goldratt \(2004\)](#) podem ser desde políticas, como a metodologia para especificação dos preços, ou gargalos produtivos, quando voltadas para a análise dos sistemas de produção.

O desdobramento da TOC para as linhas de produção seriadas leva em consideração que as restrições são gargalos produtivos, denominados recursos restritivos de capacidade. Nesta aplicação, mesmo em empresas com capacidade produtiva maior do que a demanda do mercado, a gestão das capacidades deve levar em consideração o recurso com a menor capacidade produtiva. Como os sistemas produtivos possuem normalmente mais de uma unidade produtiva ligada em série, a capacidade do menor recurso representa o limite da capacidade da linha em atingir o objetivo de taxa produtiva.

Em cinco das seis configurações apresentadas por [Fry e Russell \(1993\)](#) e utilizadas para a tese, as linhas de produção apresentam um ou mais gargalos. A configuração perfeitamente balanceada é a única que não considera a existência de gargalos. As configurações em *bowl* e segmentado apresentam dois gargalos. A configuração em 'V', ou *bowl* invertido é a única que não contém o gargalo na primeira estação de trabalho.

Como a teoria das restrições trata somente de linhas desbalanceadas e não busca o balanceamento da linha, a aplicação da TOC nos sistemas produtivos passa a se concentrar na gestão do fluxo de materiais, aplicando os passos seguintes, de forma cíclica ([GOLDRATT; FOX, 1986](#)):

- a) Identificar o gargalo;

- b) Explorar a utilização do gargalo;
- c) Subordinar os demais recursos à utilização do gargalo;
- d) Aumentar a capacidade do gargalo
- e) Identificar o novo gargalo.

A aplicação da TOC nas linhas de produção é destinada, então, a garantir a continuidade do fluxo por meio do bloqueio do efeito das variações nos tempos de processo utilizando-se da adição de estoques de materiais em processo (*buffers*) entre as áreas, mais especificamente antes dos recursos com restrição de capacidade, os gargalos. Assim, ao manter um *buffer* antes do gargalo, é possível compensar uma variação negativa e manter a taxa produtiva média do gargalo.

A solução proposta pela TOC, conhecida como tambor-pulmão-corda ou *drum-buffer-rope*, para a produção em série, busca estabelecer estoques de segurança somente nos gargalos de cada processo, desbalanceando o sistema. Por este motivo que a TOC sugere que as linhas de produtos em série se utilizem, predominantemente, de linhas desbalanceadas (GOLDRATT, 1981).

Trabalhos posteriores visaram comparar e encontrar possíveis discrepâncias entre os princípios da TOC com a qualidade total e o *just in time* (LEPORE; COHEN, 1999). Outras pesquisas continuaram sendo desdobradas para a determinação *mix* de produtos que otimize o resultado financeiro (CHAHARSOOGHI; JAFARI, 2007; YAHYA-ZADEH, 2011) e outros pontos, como a atenção dispensada aos *free-goods*. Os *free-goods* são materiais que não passam nas restrições, mas que podem interferir significativamente no resultado geral da programação. Foi verificado que o desempenho da programação com a DBR é muito sensível aos níveis de *free-goods* utilizados na linha (CHAKRAVORTY; ATWATER, 2005).

A configuração segmentada, apresentada por Fry e Russell (1993) e utilizada na fundamentação da tese, representa o modelo proposto pelo DBR para as linhas de produção seriadas.

### 2.5.2 Contabilidade de Ganhos

A contabilidade de ganhos é um desdobramento da TOC que procura apresentar alternativas de Contabilidade Gerencial para suprir dificuldades enfrentadas pelos modelos de contabilidade baseados em custos (SILVA; MENEZES, 2005). Sua origem data da primeira publicação da TOC (GOLDRATT; COX, 1984), sendo desenvolvida por meio de outros trabalhos que tratam do tema contabilidade como fonte de informação para a tomada de

decisão (GOLDRATT, 1990; GOLDRATT; FOX, 1986). Ela foi escolhida para fundamentar a análise de viabilidade da configuração a ser sugerida pelo modelo da tese por não considerar possíveis efeitos da redução de utilização dos equipamentos na composição de custos dos produtos.

São utilizados três conceitos básicos, segundo a contabilidade de ganhos: ganho, despesa operacional e investimento. Este último, de acordo com alguns autores (CORBETTNETO, 1997), pode ser traduzido como inventário, pela forte ênfase dada aos estoques. Pela proposta, todo e qualquer recurso financeiro utilizado na empresa deve estar classificado em uma destas três categorias.

O sistema contábil de Goldratt é formado por três blocos de construção: Ganho, Despesa Operacional e Inventário. Ganho é definido como o índice pelo qual o sistema gera dinheiro (i.e., fluxos de caixa aumentados) mediante vendas. Os inventários são definidos como todo o dinheiro que o sistema gasta para transformar o inventário em ganho . . . A despesa operacional consiste de todas as demais despesas que são deduzidas para chegar ao ganho. (NOREEN; SMITH; MACKAY, 1995)

Assim, todo tipo de despesa deve também ser alocado em uma destas categorias, sem buscar qualquer tipo de rateio ou divisão. Se o custo varia com a produção, entra no ganho; se não, na despesa operacional. Quando é um item imobilizado, entra no investimento. A depreciação e amortização entram na despesa operacional.

Um dos princípios da contabilidade de ganhos é o de evitar qualquer tipo de rateio e alocação de custos para a tomada de decisão. A partir destes três indicadores locais torna-se possível obter indicadores globais, como o lucro líquido e o retorno de investimento - ROI (GOLDRATT, 1990).

$$\textit{LucroLiquido} = \textit{Ganho} - \textit{DespesaOperacional}$$

$$\textit{ROI} = \frac{(\textit{Ganho} - \textit{DespesaOperacional})}{\textit{Investimento}}$$

O método apresentado por Goldratt (1990) se baseia na ideia de que a empresa com fins lucrativos deve ser entendida como uma máquina de fazer dinheiro. Fazer dinheiro, significa ter mais lucro, em termos absolutos, ou mais retorno de investimento - ROI, em termos relativos.

Assim, para fazer mais dinheiro não importa a eficiência de cada centro de trabalho, por exemplo. O que importa é que as decisões resultem em aumentar o ganho (vendendo

mais ou reduzindo os custos totalmente variáveis), diminuir as despesas fixas ou reduzir o investimento (que pode ser conseguido com menos estoques para garantir a mesma entrega).

Com a contabilidade de ganhos é proposta uma forma de avaliar as decisões e, principalmente, de enxergar os estoques e os custos (CORBETTNETO, 1997; GOLDRATT, 1990; NOREEN; SMITH; MACKEY, 1995). Uma das diferenças para os modelos tradicionais baseados em custeio é o entendimento de que o material produzido para estoque não necessariamente significa material vendido. Assim, o fato de uma máquina ficar parada, aumentando o tempo ocioso (*idle time*) e diminuindo a eficiência da linha não é necessariamente ruim. Por isso não há a preocupação com a eficiência em máquinas que não sejam gargalos.

Desta forma, os modelos de contabilidade gerencial baseados em sistemas de custeio acabam favorecendo aplicações de distribuição de capacidade que busquem linhas balanceadas. Estes modelos podem ser mais aplicáveis a situações de produção de *commodities*, por exemplo, cuja venda do estoque é relativamente certa. Para produtos perecíveis contudo, com alta diversificação ou alto custo de estoque, por exemplo, o trabalho buscando a redução de tempos ociosos em todas as estações de trabalhos, com linhas balanceadas, pode implicar em maiores estoques e maior perda.

Se o objetivo da decisão pela contabilidade de ganhos é o de melhorar o retorno sobre o investimento - ROI, a decisão deve resultar em mais venda, menos estoques (ou menos investimento para a mesma venda) ou menos despesas fixas. Também vale uma combinação destes índices que traga uma fração mais favorável de ROI, por exemplo com um aumento de investimento, mas com uma relação mais favorável de aumento no ganho.

Ao se investir em mais capacidade (com mais equipamentos ou mais funcionários) para desbalancear uma linha, está sendo incrementado o investimento ou a despesa operacional. Isso porque o aumento de capacidade produtiva se dará pela compra de novos equipamentos (mais investimento), ou pelo uso de mais mão-de-obra (mais despesa operacional). Qualquer uma destas duas opções causa um impacto negativo no ROI.

Para que o aumento de capacidade traga resultado positivo, é preciso que haja aumento na produtividade da linha, revertida em mais vendas, ou redução do estoque. Vale destacar que o aumento de produtividade da linha só é positivo se vier com mais vendas ou redução de despesa operacional. Este aumento reflete-se então em maior ganho - G.

Ao estar relacionado a equipamentos não gargalo, o aumento de produtividade não estará atrelado a um resultado superior de vendas, já que a capacidade do sistema produtivo continua limitada à capacidade do gargalo. Então a expectativa é de redução do estoque

em processo (menos ativos e menor investimento).

O que precisa ser avaliado, então, é se o impacto financeiro deste aumento de capacidade é compensado pelo impacto financeiro da redução de estoques (SILVA; MENEZES, 2005). Com base nestes princípios da contabilidade de ganhos e aplicação da teoria das filas foi possível estabelecer um modelo matemático para identificar o tamanho ótimo de estoque de proteção (*buffer*) a ser colocado antes dos gargalos, segundo Radovilsky (1998).

Também por estar alinhada com a ideia do desbalanceamento de capacidade (sem contrariar as premissas aplicadas para o balanceamento de capacidade) que a Contabilidade de Ganhos foi escolhida para fundamentar a avaliação de viabilidade do aumento de capacidade durante esta tese.

---

## Aspectos Metodológicos

---

Sem mudar nossos padrões de pensamento, não conseguiremos resolver os problemas que criamos através deles.

(Albert Einstein)

Este capítulo é dividido em duas seções e apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para a realização da pesquisa. Na primeira parte do capítulo é caracterizado o tipo de pesquisa e são apresentadas as principais características metodológicas da composição do trabalho. A segunda parte apresenta, sob a forma de planejamento de experimento (*Design of experiment* - DOE) o passo a passo para a realização das simulações.

### 3.1 Apresentações dos aspectos metodológicos

O aumento de produtividade, aliada à melhor gestão dos recursos produtivos, tem sido questão recorrente de um amplo espectro de unidades industriais, sejam elas instalações automobilísticas, químicas, petroquímicas, siderúrgicas, têxteis ou metalúrgicas. A vantagem competitiva obtida da redução de custos logísticos é, então, defendida por vários tipos de empresas, desde empresas de alta tecnologia à indústria de vestuário (HARLE; PICH; HEYDEN, 2001; LEE; BILLINGTON; CARTER, 1993; SWAMINATHAN; TAYUR, 1999). Da mesma forma, empresas que se destacam pela produtividade e performance de seus negócios justificam a busca constante por cadeias de suprimentos otimizadas e enxutas (NAGURNEY, 2010; LAPIDE; COTTRILL, 2004).

Surge então a pergunta: é possível obter melhores desempenhos produtivos por meio do rearranjo e redistribuição das capacidades linhas de produção de unidades industriais? Em que cenários as distribuições de capacidade desbalanceadas podem resultar em melhor desempenho, se é que podem? É possível redistribuir a capacidade de estações de trabalho das empresas para apresentar propostas de otimização de desempenho por meio do desbalanceamento de sua linha? Como o *mix* de produtos a ser processado e outras características da linha estão relacionados com o desbalanceamento e a eficiência produtiva. Estas são algumas questões problema que envolvem esta tese e são respondidas no decorrer desta pesquisa.

A tese defendida é de que as distribuições de capacidade desbalanceadas de formato linear ou em passo são menos atingidas pela utilização de *mix* diversificados, apresentando maior

taxa de produção e menor nível de estoque, para configurações de linhas de produção discretas em série, com até cinco estações de trabalho. Esta seção tem o objetivo de apresentar a estrutura e o arcabouço metodológicos que compõem a comprovação desta tese. Trata-se do relato de como é desenvolvida a pesquisa, de forma a prover validade e sustentação científicas para as respostas às perguntas apresentadas.

A primeira parte do trabalho é constituída de uma pesquisa bibliográfica, seguindo o protocolo de pesquisa apresentado no capítulo anterior. Em seguida são utilizadas simulação e modelagem como técnicas para a investigação das questões da pesquisa. Uma primeira simulação é realizada com um modelo de *mix* dedicado de linha, a fim de analisar o comportamento do sistema produtivo quando submetido a diferentes condições de distribuição de capacidade. Com base nos resultados destas simulações, o modelo é refinado e novas questões a serem investigadas são utilizadas na construção do segundo experimento. É elaborado, em seguida, um modelo computacional de simulação em Excel, visando a introdução de diferentes tipos de *mix* produtivos sob diferentes configurações de distribuição de capacidade.

Ao final da pesquisa, o modelo é aplicado em uma linha real de produção, com os objetivos de validar sua aplicabilidade em linhas reais e apresentar uma proposta de configuração de capacidade mais adequada para a linha em questão. Para a proposta de configuração de capacidade indicada é também realizada uma análise da viabilidade segundo a contabilidade de ganhos, metodologia de contabilidade gerencial detalhada na Seção 2.5.2.

Neste sentido, a modelagem e simulação computacional, que se utilizam de representações simbólicas ou modelos para melhor entender e analisar as interações de várias partes do sistema, de acordo com Harrel et al. (2002), tornam-se de grande valia, pois permitem manipular grandes volumes de dados com velocidade e precisão.

Uma linha de produção em série composta de cinco estações de trabalho, processando um único tipo de item e sem estações em paralelo é a base para o modelo inicial. Conforme já mencionado, esta configuração é escolhida pela pouca complexidade inicial e por se adequar a diversas situações reais de linha produtiva. A simulação computacional desenvolvida a partir deste modelo possibilita alternar diversas configurações de capacidade e verificar os efeitos nos indicadores de desempenho da linha.

Para a aplicação e validação do modelo, utilizando-se de uma linha real de produção, foi escolhida uma linha de fabricação de guardanapos embalados de papel. A escolha se deu por a linha apresentar características adequadas ao problema proposto, com produção discreta assíncrona e não cadenciada (estes conceitos serão caracterizados durante a revisão bibliográfica) com até cinco estações de trabalho. Também foi escolhida por se utilizar de *mix* diversificado de produtos e pela facilidade de acesso aos dados produtivos. A linha

é composta de até cinco etapas produtivas: acoplagem, impressão, refilamento, corte e embalagem.

Como muitas linhas de produção simples, esta linha de guardanapos embalados é constituída por maquinários específicos, desenvolvidos nacionalmente, com baixo nível de automação e com processos independentes. Estas características são presentes em diversos outros produtos, como descartáveis de plásticos, embalagens, moda e eletrônicos, entre outros.

Sendo assim, com relação aos procedimentos técnicos, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental. A pesquisa experimental é um estudo no qual uma ou mais variáveis independentes são manipuladas e no qual a influência de todas ou quase todas as variáveis relevantes possíveis não pertinentes ao problema da investigação é reduzida ao mínimo (KERLINGER, 1980). Este tipo de pesquisa procura encontrar relações causais entre duas ou mais variáveis pelo modo experimental. Neste caso, a relação entre os parâmetros de capacidade da linha e os índices produtivos, como a taxa de produção do sistema e os estoques de material em processo. O processo consiste em variar a causa (os parâmetros da distribuição de capacidade), controlar variáveis interferentes (por meio da simulação) e medir os efeitos.

Do ponto de vista dos objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória, já que visa proporcionar mais familiaridade com o problema da viabilidade do desbalanceamento, tornando explícito e construindo hipóteses (GIL, 1999). Neste sentido, faz-se necessária a validação da hipótese fundamental que sustenta a tese. Ao se verificar, dentro do nível de significância planejado, que as distribuições de capacidades linear e em passo se destacam das demais linhas, quando comparados os impactos advindos da introdução de *mix* diversificados de produtos, evidenciam-se os elementos necessários à sustentação da tese.

As referências são utilizadas para identificar o que já havia de pesquisa sobre o assunto e como poderia ser a proposta do modelo para avaliar a viabilidade das linhas balanceadas. Como toda pesquisa exploratória, trata-se de uma área desconhecida, sendo importantíssima a intuição do pesquisador (GIL, 1991). A pesquisa bibliográfica, junto com a intuição e as percepções obtidas durante a simulação permitem a formulação de uma proposta para o modelo, cuja elaboração demanda uma abordagem predominantemente quantitativa.

Silva e Menezes (2005) destacam que a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, ou seja, pode se traduzir em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Apontam que este tipo de pesquisa requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc.) para a validação das hipóteses do trabalho. Para

a sustentação da tese de que as configurações de capacidade linear e em passo são menos atingidas pela utilização de um *mix* variado de produtos, as características quantitativas tornar-se-ão ainda mais evidentes, já que estruturação de um modelo computacional será parte importante para a análise e a utilização de métodos quantitativos, como teste de normalidade e ANOVA, fundamentará a avaliação.

A abordagem quantitativa é importante também para etapas como a elaboração da simulação, do modelo matemático e validação do modelo computacional, com a expectativa de que o modelo seja testado em situações reais. Para a validação da hipótese desta pesquisa, a modelagem utiliza o método dedutivo, buscando explicar o conteúdo por meio de suas premissas (GIL, 1999; LAKATOS; MARCONI, 1991).

Assim, a inferência estatística será utilizada para a validação das hipóteses da pesquisa. De acordo com Moore et al. (2006), o propósito da inferência é tirar conclusões a partir dos dados disponíveis, conclusões essas que levam em conta a variabilidade natural dos dados. Para fazer isso, a inferência formal baseia-se na probabilidade para descrever a variação que se produz pelo acaso.

Para a simulação utilizada nesta tese utiliza-se, inicialmente, um software específico, o Witness, que permite realizar testes com diferentes configurações de capacidade e desbalanceamento. Os resultados obtidos possibilitam uma análise gráfica e estatística das implicações do desbalanceamento para os estoques em processo e o desempenho total produtivo do sistema. Das conclusões obtidas com o emprego da simulação com o Witness é montado um novo modelo computacional, em Excel, que dá prosseguimento ao experimento.

Dolgui et al. (2002) defendem que muitos problemas envolvendo otimização em linhas de produção, em especial envolvendo *buffers*, são precisamente descritos envolvendo métodos analíticos. Entretanto, para linhas um pouco mais complexas, a modelagem das linhas se torna muito mais complicada. Então a maioria dos modelos analíticos solucionáveis, nestes casos, são desenvolvidos apenas para linhas de duas ou, algumas vezes, três máquinas.

O uso de simulações não tem sido novidade para o estudo das questões referentes ao projeto de linhas produtivas. Isso porque a simulação consegue uma melhor aproximação dos modelos com as situações reais e resolve muitas das limitações encontradas nos modelos analíticos.

Gershwin e Schor (2000) também destacam que a principal vantagem da simulação é o seu potencial para tratar com classes mais amplas de sistemas quando comparada aos modelos analíticos.

Outro aspecto a ser destacado relativo à sustentação da tese é a aplicação do modelo computacional desenvolvido em uma linha real de produção. Como o problema que suscitou a formulação da tese envolve a dificuldade de aproximar-se a discussão acadêmica dos casos práticos, torna-se importante a aplicação do modelo em uma empresa real.

Esta utilização de uma linha de produção real para a validação da pesquisa, faz com que a pesquisa possa ser caracterizada também como um estudo de caso. Isto não significa que os resultados e soluções apontados pela tese sejam aplicados única e exclusivamente para a linha utilizada. Apenas é importante caracterizar a metodologia do estudo de caso, de forma a atribuir as vantagens advindas de sua utilização. Um estudo de caso é uma unidade de análise em uma pesquisa de caso. É possível utilizar diferentes casos a partir da mesma firma para estudar diferentes questões, ou pesquisar a mesma questão em uma variedade de contextos na mesma firma (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002). Segundo Meredith (1998), as pesquisas de caso trazem vantagens importantes, como:

- a) O fenômeno pode ser estudado em sua forma natural com uma teoria significativa e relevante gerada pelo entendimento obtido por meio da observação da prática atual;
- b) O método do caso permite que questões de por que, o que e como sejam respondidas com um entendimento relativamente total da natureza e complexidade do fenômeno completo;
- c) O estudo de caso se presta à investigação exploratória antecipada, onde as variáveis são ainda desconhecidas e o fenômeno ainda não está plenamente compreendido.

A maior parte da pesquisa conduzida no campo de gestão de operações é baseada em métodos racionalistas, principalmente em análises estatísticas de pesquisas e modelagem matemática (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002). Contudo a explanação dos achados quantitativos e a construção da teoria baseada nestes achados terá que ser baseada em um entendimento qualitativo (MEREDITH, 1998), o que torna o estudo de caso muito importante nesta área.

O fato de escolher o tipo de empresa para a validação do modelo nesta tese caracteriza uma amostra intencional (SILVA; MENEZES, 2005), onde as características da amostra são pré-determinadas pelo pesquisador. Sendo uma amostra não-probabilística, provavelmente abrirá espaço para novos testes que ampliem o escopo do modelo ou tratem de maneira mais específica o tipo de linha de produção, o que já indica a possibilidade de trabalhos futuros.

### 3.2 *Planejamento de experimento - DOE*

O uso adequado das técnicas estatísticas é fundamental para a defesa de uma tese de estudo. Por mais correta que esteja uma assertiva a ser defendida, caso a metodologia utilizada para chegar à conclusão seja falha ou apresente pontos estatisticamente frágeis, não há como garantir a sustentação da tese.

Neste sentido, é importantíssimo que os passos a serem executados para a experimentação utilizada nesta tese estejam tecnicamente protegidos desde o seu planejamento. De acordo com Fisher (1936), caso o plano do experimento seja falho, qualquer método ou interpretação que se faça decisivo será também falho.

Assim, o planejamento de experimento, também conhecido pela sigla DOE, de *design of experiment*, é o termo para as técnicas empregadas na escolha eficiente do experimento a ser realizado (CAVAZZUTI, 2013).

Montgomery (2008) afirma que experimentos são realizados em quase todos os campos de investigação, sendo também utilizados para estudar a performance de processos e de sistemas. Um processo pode ser definido como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam entradas (*input*) em saídas (*output*) e possuem um ou mais resultados observáveis. Nos processos, algumas variáveis são controladas e outras não, sendo muitas vezes o controle das variáveis feito no intuito de se realizar um teste ou experimento.

O próprio experimento pode ser visto como um processo, ainda de acordo com Montgomery (2008), sendo que os seus objetivos incluem: determinar que variáveis mais influenciam nos resultados observáveis, determinar aonde ajustar as variáveis de controle influentes de tal forma que o resultado esteja quase sempre próximo do ótimo valor desejado, que a variabilidade da resposta seja baixa e que o efeito das variáveis não controladas seja mínimo. Sob esta mesma linha de raciocínio, Cavazzuti (2013) defende que o propósito de um experimento é, essencialmente, uma otimização.

A terminologia utilizada na DOE também é específica e largamente empregada. Segundo Cavazzuti (2013), os principais termos são:

- a) Fatores (*factors*). Os fatores são as variáveis ou parâmetros a serem testados. Também chamadas de parâmetros ou tratamentos. Podem ser variáveis discretas qualitativas ou quantitativas, sendo que as quantitativas são discretizadas dentro de um range estabelecido;
- b) Região de interesse (*region of interest*). Também chamado espaço do projeto, é o

range de variabilidade a ser definido para cada variável. Este número é restrito e geralmente pequeno. A princípio, o espaço solução não é conhecido e pode acontecer da região de interesse não incluir o projeto ótimo. Sendo compatível com os requerimentos do projeto, a região de interesse pode ser ajustada posteriormente, assim que o erro da escolha for detectado;

- c) Nível (*level*). Os níveis indicam o número de diferentes valores que as variáveis podem assumir durante a discretização. São as faixas de valores das variáveis de controle. O número de níveis é escolhido de acordo com a quantidade de experimentos que podem ser executados. O número de níveis usualmente é o mesmo para todas as variáveis, porém algumas técnicas de DOE possibilitam diferenciação;
- d) Variáveis resposta (*response variable*). São os parâmetros de saída, resultantes de uma variação nas variáveis de entrada. Sendo o experimento um processo de otimização, as variáveis resposta são a função objetivo do experimento a ser otimizado;
- e) Conjunto de experimentos (*set of experiments*). É o espaço amostral do experimento;
- f) Aleatorização (*randomization*). É a prática de escolher os pontos experimentais por meio de um processo aleatório. Serve para garantir condições de identidade e independência nos dados coletados, assim como para evitar erros sistemáticos;
- g) Blocos (*blocks*). Agrupamentos dos dados, de forma a eliminar fontes de variabilidade que não são de interesse do experimento.

Os passos para a realização do DOE podem variar de autor para autor, mas normalmente mantém pontos em comum. Coleman e Montgomery (1993) sugerem: caracterização do problema; escolha dos fatores de influência e níveis; seleção das variáveis de resposta; determinação de um modelo de planejamento de experimento; condução do experimento; análise dos dados; conclusão e recomendações. Jeffers (1978) estrutura as seguintes necessidades para a realização do DOE:

- a) Estabelecer os objetivos. É preciso explicitar claramente os objetivos, as razões para executar o experimento e traduzir estes objetivos em questões precisas, as quais devem ser respondidas pelo experimento;
- b) Definir a população sobre a qual é feita a inferência. Neste ponto avalia-se também se os limites da realização do experimento são representativos para a população;
- c) Selecionar os tratamentos do experimento. Os tratamentos devem estar suficientemente e precisamente definidos para serem aplicados de forma correta, podendo ser replicados por aqueles que desejem repetir o experimento;
- d) Projetar a área de interesse e a forma do experimento. De acordo com a natureza do material do experimento;

- e) Indicar o número de repetições, considerando uma estimativa preliminar da precisão desejável pelo experimento;
- f) Definir o arranjo do experimento. Dividindo os materiais em blocos dentro dos quais a variação dos materiais seja minimizada;
- g) Aleatoriedade. Deve estar explícito um procedimento para garantir a aleatoriedade dentro do experimento, de forma a possibilitar a aplicação correta das técnicas estatísticas;
- h) Registro dos resultados. Deve estar clara a quantificação dos resultados, garantindo que não haja ambiguidade no plano do experimento;
- i) Planejamento para a análise. As hipóteses a serem testadas na análise dos resultados do experimento, assim como suas alternativas, devem ter sido definidas *a priori*. Assim os métodos devem também estar definidos de forma apropriada para cada hipótese.

Assim, o problema deste DOE envolve a comprovação da tese, de que as linhas de produção em série com até cinco estações de trabalho, quando arranjadas com uma distribuição de capacidade linear ou em passo, reagem melhor à introdução de *mix* diversificados de produtos, com menor impacto na performance em termos de volume de produção e quantidade de estoque em processo na linha.

O objetivo do DOE envolve diretamente o problema, devendo testar e avaliar o desempenho de uma linha de produção seriada com cinco estações de trabalho sujeita à introdução de *mix* diversificados de produtos, sob cinco diferentes configurações de distribuição de capacidade. Ao final do experimento, espera-se que estejam identificadas nas linhas testadas quais configurações de capacidade respondem melhor á introdução de *mix* diversificado de produtos e quais são os benefícios em termos de TR e WIP. Os objetivos atendem, desta forma, às condições estabelecidas por Fisher (1936), de que o objetivo seja mensurável, de resultado prático, específico e não tendencioso.

Duas serão as variáveis resposta avaliadas durante o experimento: o TR (*throughput* ou volume total de produção) e o WIP (*work in process* ou volume médio de estoque). Para o TR será verificado o valor do volume final produzido após um tempo estabelecido de 2.000 interações. Isto porque a sensibilidade do valor acumulado de volume de produção é maior do que a do valor médio. Já para o WIP será verificado o valor médio entre 1.000 e 2.000 interações. Neste caso a média é preferida, devido à oscilação característica do estoque com o tempo. Já a determinação do nível da variável compreendendo o espaço entre 1.000 e 2.000 interações se dá por ser tempo suficiente para estabilização do nível de estoque.

As variáveis de controle do experimento serão quatro. O número de interações, que representa o tempo de operação da linha, é a primeira. O número de interações atingirá 2.000 interações para cada configuração testadas. A segunda é o nível de desbalanceamento do sistema, causado pela introdução do *mix*, que provoca mudanças no tempo de ciclo das estações de trabalho, quando comparados á condição referência de linha balanceada. Este tempo de ciclo do *mix* pode variar aleatoriamente até 100% do tempo original, referência, para mais ou para menos. A terceira é o nível de desbalanceamento proposital da linha, em cada uma das configurações, que é, calculado por meio do índice BE - Eficiência de Balanceamento, apresentado no capítulo anterior. Finalmente, a quarta será o estoque inicial por estação, que deve ser diferente de zero e em um valor suficiente alto para garantir que não haja paradas iniciais por falta de estoque em processo, características de partida de linha.

Os fatores a serem variados durante o experimento são dois: a configuração de distribuição de capacidade e os *mix* de produtos introduzidos na linha.É importante considerar que ambos os fatores acabam resultando em alterações na configuração de capacidade, contudo, a origem desta variação na capacidade é diferente. Enquanto as distribuições são determinadas no projeto da linha para lidar com um determinado tipo de produto, a introdução do *mix* ocorre por questões mercadológicas, podendo causar variações aleatórias ou sem padrão específico.

Cinco serão as configurações de distribuição de capacidade, sendo que para cada configuração serão utilizados 30 diferentes níveis de desbalanceamento. Para os *mix* de produtos, serão também introduzidos 30 diferentes *mix*, de forma aleatória. Desta forma, serão pelo menos 450 diferentes simulações, envolvendo múltiplas variáveis. Sobre estas 450 diferentes simulações, serão listados e rotulados os resultados envolvidos, assim como os fatores, as variáveis de controle e as variáveis de resposta.

A simulação de Monte Carlo estará restrita á representação de uma linha seriada com cinco estações de trabalho, não levará em consideração o tempo de *set up* ou o sequenciamento do *mix*. A simulação será rodada em uma planilha Excel utilizando do método de Monte Carlo, a fim de facilitar a entrada de dados e a alteração dos parâmetros, além do que não há a necessidade de simuladores sofisticados, com interfaces gráficas mais elaborada, bastando o resultado final da simulação.

Para a primeira etapa da simulação, será dada preferência aos cenários anteriormente simulados como simulador Witness.

O planejamento experimental será do tipo fatorial, apropriado quando diversos fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e as interações entre os fatores podem ser importantes. Isto significa que em cada repetição completa do experimento todas as

combinações possíveis dos níveis dos fatores (tratamentos) são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização dos ensaios são feitas de modo aleatório. Com este plano experimental são obtidas estimativas e comparações dos efeitos dos fatores, estimativas dos possíveis efeitos de interações e estimativa da variância.

Os resultados serão tabulados e plotados em gráficos, sendo que, além da análise gráfica dos resultados, será utilizada a técnica de ANOVA (análise de variância) para a avaliação dos resultados.

Para uma melhor visualização do planejamento do experimento - DOE, é apresentada, de forma sintética, a Tabela 3.1 a seguir, com as características deste procedimento:

Tabela 3.1: Planejamento de experimento - DOE

Etapa	Descrição
Relato do problema - descrição da tese defendida	As linhas de produção em série com até cinco estações de trabalho, quando arrançadas com uma distribuição de capacidade crescente ou em passo, reagem melhor á introdução de <i>mix</i> diversificados de produtos, com menor impacto na performance em termos de volume de produção e quantidade de estoque em processo na linha (WIP).
Definição de objetivos do experimento	o objetivo do DOE é testar o desempenho de uma linha de produção com cinco estações de trabalho sob cinco diferentes configurações de distribuição de capacidade.
Variáveis resposta	- TR: Volume de produção da linha, em peças, obtido por meio de Simulação de Monte Carlo no Excel - WIP: Nível médio de estoque da linhas, em peças, obtido com o uso de Simulação de Monte Carlo no Excel
Listagem para cada variável resposta	TR - Volume após 1.000 interações de cada condição da simulação. WIP - Estoque médio entre 500 e 2.000 interações da simulação, para cada condição.
Listagem para cada variável controle	- n = 2.000 interações. - <i>mix</i> variando em 100% do tempo de ciclo - BE: Indicador de eficiência do balanceamento - EI: Estoque inicial por estação
Fatores e níveis	- Configurações de capacidade: balanceada, <i>bowl</i> , crescente, passo e segmentada. 30 diferentes níveis de desbalanceamento para cada configuração. - <i>Mix de produtos</i> agrupados quando há mudança de posição do gargalo. 30 diferentes <i>mix</i>

Listagem e rotulagem	Após a geração das capacidades aleatória dentro das distribuições, são classificadas as situações onde houve mudança de posição do gargalo e de distribuição de capacidade
Restrições	- Capacidade do Excel (geração de números aleatórios) - Tempo para realização do experimento - Tempo para validação em empresas reais
Preferência	Cenários anteriormente testados com simulador Witness
Planejamento experimental	Fatorial
Realização e acompanhamento do experimento	- Gráficos de linha - Tabulação dos resultados
Análise de dados	ANOVA
Conclusões e recomendações	- Métodos gráficos - Validação em uma empresa real

Este DOE não é imutável, posto que o objeto de estudo é desconhecido e sujeito á descoberta de informações relevantes com o decorrer do experimento. Assim, é possível que sejam acrescentados novos testes a este formato inicial do DOE, os quais devem ser relatados no capítulo da simulação.

---

## Simulações e resultados

---

Dar um exemplo não é a melhor maneira de influenciar os outros, é a única.  
(Albert Schweitzer)

Este capítulo visa a compreensão, através do uso de simulações e modelos computacionais, dos dois aspectos centrais do trabalho e que resultam na tese defendida: o primeiro, a interferência da configuração de capacidade nos objetivos de desempenho da linha de produção; o segundo, os efeitos dos *mix* produtivos diferenciados nestas alternativas de configuração de capacidade.

Inicialmente, através de um simulador de uso comercial, o software Witness, é testada a evolução da eficiência produtiva (*throughput* - TR e estoque em processo - WIP) de uma linha sob diferentes níveis de balanceamento, até a condição de balanceamento ideal. Com base nos resultados desta simulação, é construído um modelo computacional visando reproduzir o comportamento das seis diferentes configurações de capacidade a serem testadas. Em seguida o modelo computacional desenvolvido é incrementado com a inclusão de *mix* de produção diversificados.

Para melhor compreensão do processo das simulações, o capítulo é dividido em quatro partes: a origem do modelo para simulação, a simulação com o *software* Witness, o modelo computacional para comparação das configurações e o modelo com o impacto do *mix*. Os resultados de cada simulação serão apresentados no decorrer de cada parte.

### 4.1 Origem do modelo para simulação

As simulações têm sido instrumentos muito frequentes, tanto na pesquisa sobre configurações de distribuição de capacidade que se utilizam do balanceamento, quanto na que trata do desbalanceamento de linhas produtivas (MCNAMARA; SHAABAN; HUDSON, 2013; SHAABAN, 2011; POWELL, 1994; CONWAY et al., 1988).

Segundo Castellucci e Costa (2015), a simulação é uma técnica para analisar as reações de um sistema, sendo que o que a torna particularmente útil para as linhas de montagem é exatamente a dificuldade de montar modelos analíticos para linhas de produção reais, mais complexas. Outro benefício das simulações é o de permitir a montagem de diferentes sistemas com diversas reações e comportamentos, o que possibilita a construção de alter-

nativas tanto para a verificação do impacto de cada variável isoladamente, quanto para a verificação da interferência das variáveis combinadas.

Em sua pesquisa sobre a distribuição de capacidade, [Genikomsakis e Tourassis \(2008\)](#) defendem que, ao invés de incrementalmente melhorar a performance através de técnicas e algoritmos que atuem sobre situações determinísticas e ideais, deve-se desenvolver um conciso ambiente de trabalho para investigar as condições estocásticas de operação da linha, utilizando-se de experimentos de simulações sob condições controladas.

O modelo básico da simulação utilizada nesta fase do trabalho inspirou-se inicialmente em um jogo de tabuleiro utilizado em treinamento para a teoria das restrições: o jogo de dados. Este modelo foi primeiramente escolhido por sua simplicidade e por ser facilmente incrementado de maneira progressiva para modelos mais complexos. Posteriormente foi verificado que este modelo também tem características que se aproximam à estrutura de linhas produtivas mais simples, como as utilizadas em bens de consumo com baixo grau de sofisticação tecnológica e materiais componentes, como embalagens, pré-moldados, injetados, entre outros produtos.

O jogo de dados (*dice game*) ([MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2014](#); [HILMOLA, 2006](#); [GUPTA; SNYDER, 2009](#); [LANGE; ZIEGENBEIN, 2005](#)) é usado para apresentar os princípios do Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope- DBR*), através de uma simulação trivial. Um processo com cinco estações de trabalho e comportamento aleatório, obtido pelo arremesso dos dados, é organizado para simular uma linha de produção.

Na primeira parte do jogo os participantes são estimulados a prever a produtividade da linha com cinco estações de trabalho após dez períodos produtivos. Cada estação é representada por um dado de seis faces e cada período produtivo representado por uma jogada do dado, conforme mostrado na Figura 4.1. Os triângulos representam os *buffers* e as estações de trabalho, os dados, são representados pelos quadrados.

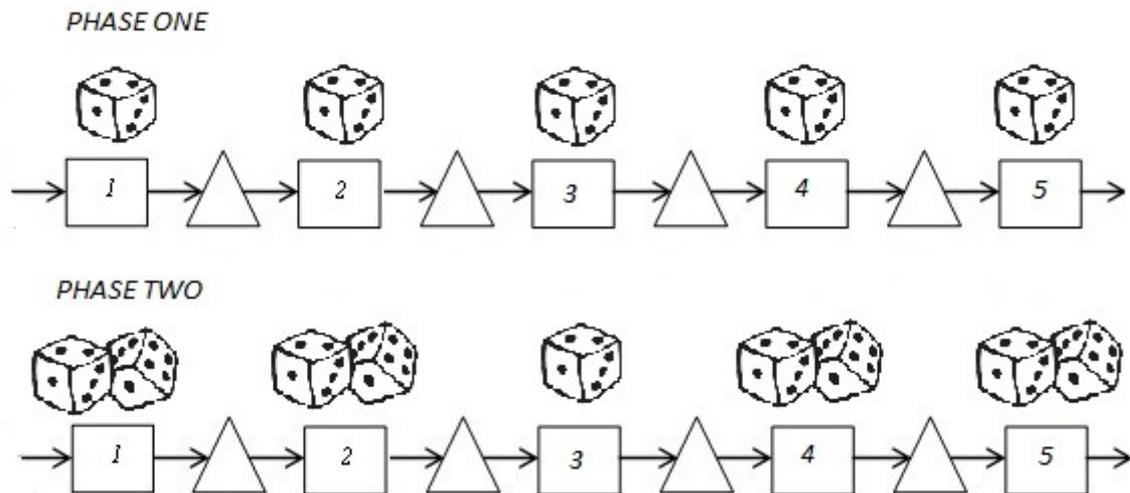


Figura 4.1: Estrutura do jogo de dados

Como cada arremesso do dado tem um resultado esperado que varia de um a seis, aleatoriamente, a expectativa é de se obter um valor em torno de 3,5 (resultado médio). Dessa forma, após uma sequência de dez jogadas é esperada a obtenção de valores próximos a 35 peças ao final da linha. Contudo, devido à variabilidade do processo e à dependência, é bastante improvável a obtenção de 35 peças ao final da linha. À medida que o jogo prossegue o inventário tende a crescer e o gargalo a mudar de posição aleatoriamente, com uma produtividade média abaixo das 3,5 peças por jogada.

Na segunda parte do jogo, a *phase two*, a linha é desbalanceada propositalmente, adicionando um dado extra a quatro das cinco estações. Assim, a produtividade da linha permanece a mesma: em média 3,5 peças por jogada ou cerca de 35 peças após dez jogadas. Isto por conta da limitação da capacidade do gargalo. Neste momento, a configuração é similar ao *bowl shape* de forma invertida, já que o gargalo está localizado no meio da linha. Esta configuração é usada somente para simplificar o jogo, criando um único gargalo ao invés de dois, do *bowl shape*.

Ao utilizar os *buffers* para controlar o estoque de produto em processo - WIP (gerenciamento de pulmão, pela teoria das restrições), durante a segunda etapa do jogo, é possível garantir a entrega consistente de 35 peças após dez rodadas. A regra do gerenciamento de pulmão consiste no estabelecimento de um limite máximo para o estoque que alimenta o gargalo. Por exemplo: 8 peças. Se o nível de estoque estiver igual ou superior a oito peças, as estações que alimentam o gargalo são bloqueadas. Se o nível estiver menor, as estações são liberadas para continuar trabalhando. Este valor é testado, sendo aumentado se não estiver conseguindo manter a produtividade desejada, ou reduzido, caso haja muita folga no estoque.

Resultados similares foram obtidos por Hillier e So (1991), indicando que configurações balanceadas obtêm melhores resultados de produtividade (*throughput*) quando dotados de *buffers* maiores e em configurações mais curtas.

Mesmo tendo grande utilidade em treinamentos e com fins acadêmicos, o jogo de dados não permite análises mais sofisticadas porque suas configurações são limitadas. Assim a proposta é utilizar simuladores de produção, como o *software* Witness, representando a estrutura do jogo de dados e as configurações a serem analisadas pela tese. Devido a limitações do programa, o gerenciamento dos pulmões será feito usando limites superiores para cada posição individual de estoque, testando cada configuração com diferentes limites.

## 4.2 Simulação com o Witness

A primeira parte do experimento é desenvolvida com a utilização de um software comercial de simulação de linhas de produção, o Witness. O objetivo desta etapa é o de analisar o comportamento de uma configuração de linha específica, o *bowl shape*, sob diferentes níveis de desbalanceamento.

O modelo foi estruturado com cinco estações de trabalho e cinco áreas de estoque (*buffers*) subsequentes, sendo o último *buffer* o de produto acabado. A fim de representar também o cliente final, foi criada mais uma entidade similar à estação de trabalho, chamada *Client*. A esse elemento (*Client*) foi associado um relatório, o *OutputReport*, que registra a produção. A estrutura da simulação montada no *software* Witness é mostrada na Figura 4.2. Está destacado na parte inferior da figura o tempo de 2.400 minutos utilizado para a simulação.

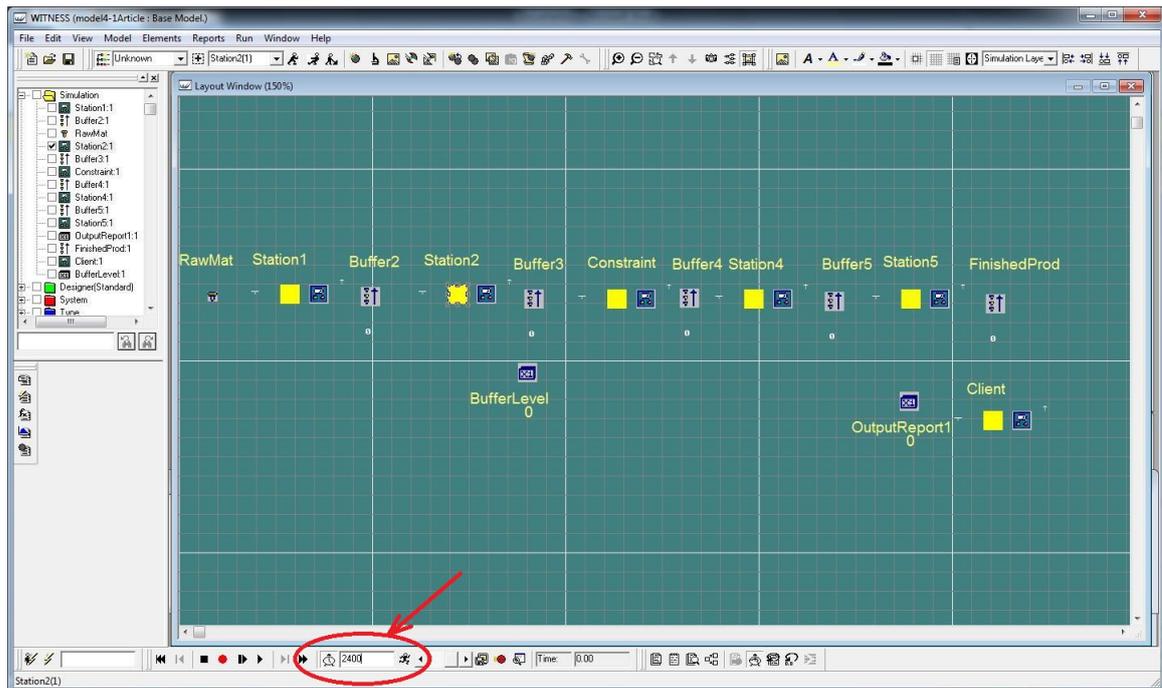


Figura 4.2: Estrutura do simulador

Embora o jogo de dados que inspirou a criação do modelo tenha se utilizado de uma distribuição aleatória, o modelo no Witness é inicialmente rodado com distribuição exponencial de tempo de ciclo das estações de trabalho. Esta distribuição foi escolhida com o intuito de comparar os resultados com o de outros trabalhos (HILLIER, 2013; HILLIER; BOLING, 1966) similares sobre distribuição de capacidade.

Os parâmetros acompanhados durante a simulação são os seguintes:

- a)  $WIP$  médio - Nível de inventário médio de cada estação durante a simulação;
- b)  $BE$  - Eficiência do balanceamento (*Balance Efficiency*);
- c)  $CTb$  - Tempo de ciclo do gargalo;
- d)  $CTi$  - Tempo de ciclo do não-gargalo  $i$  ( $i = 1$  a  $m$ );
- e)  $TR$  - Produção (*throughput*) da linha, ou o número de peças entregues ao fim da simulação;
- f)  $IL$  - Nível de estoque ao fim da simulação;
- g)  $time$  - Tempo usado para rodar a simulação.

As características do tempo de ciclo (*cycle time* -  $CT$ ) são definidas para cada estação por meio de tela de configuração como a exemplificada na Figura 4.3. Na tela está

definido o tempo de ciclo da primeira estação de trabalho (*Station1*) como sendo de dez minutos, seguindo a distribuição exponencial e de forma independente das demais estações de trabalho.

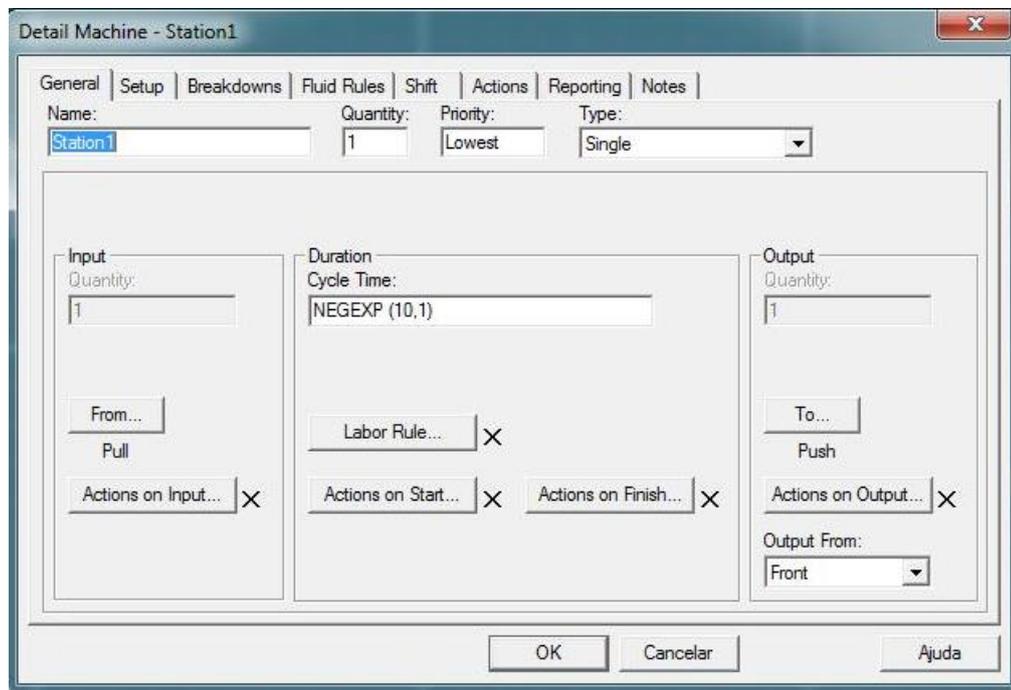


Figura 4.3: Características do tempo de ciclo de cada unidade

Para a configuração inicial, da linha balanceada, foi estabelecido o mesmo valor e a mesma distribuição de frequência para todas as estações de trabalho: dez minutos com distribuição exponencial. Em seguida, para as configurações desbalanceadas, reduzia-se gradativamente o tempo de ciclo das estações centrais, conforme a Tabela 4.1, resultando em um valor de BE (*balance efficiency*) para cada nível de desbalanceamento.

Tabela 4.1: Tempo de ciclo das estações de trabalho

Passo	Gargalo1	Est2	Est3	Est 4	Gargalo2	Cliente	BE
1	10	10	10	10	10	10	100 %
2	10	9,9	9,8	9,9	10	10	99,2 %
3	10	9,8	9,6	9,8	10	10	98,4 %
4	10	9,7	9,4	9,7	10	10	97,6 %
...	10	...	...	...	...	10	...
50	10	5,1	0,2	5,1	10	10	60,8 %

Visando garantir que os efeitos do *start up* (início da operação da linha) não influenciem os resultados, o tempo para rodar a simulação foi escolhido de forma a ser suficiente para

estabilizar o WIP e a produtividade da linha. As premissas consideradas para a simulação são, desta forma, as seguintes:

- a) Todos os não-gargalos têm tempo de ciclo independentes, com o mesmo tipo de distribuição de probabilidade e a mesma variabilidade;
- b) A linha produz um único modelo, um único tipo de produto, de forma a ser considerada uma linha dedicada;
- c) Cada tarefa pode ser executada somente na sua estação específica, não existindo multi-tarefa;
- d) O *Bowl shape* se caracteriza por dois gargalos idênticos, nos dois extremos da linha, com capacidade das estações simétricas em relação à estação de trabalho central;
- e) Não há limitação de capacidade para o *buffer*.

Para representar o *buffer* ilimitado, foi estabelecido um valor muito alto (1.000 peças), conforme Figura 4.4

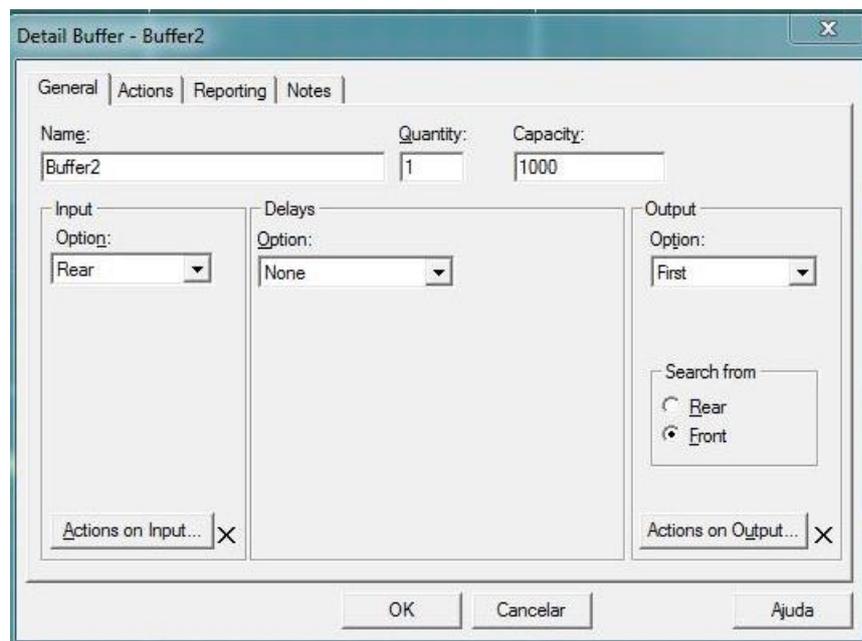


Figura 4.4: Parâmetros do *buffer*

#### 4.2.1 Resultados do desempenho de configurações de capacidades

Após simular 50 diferentes configurações de linha, reduzindo o nível de balanceamento desde a linha balanceada ideal ( $BE = 100\%$ ) e aumentando gradativamente o desbalan-

ceamento (até  $BE = 60,8\%$ ), os resultados encontrados são projetados na Figura 4.5. Os dados coletados estão tabelados na Tabela A.1 do Apêndice.

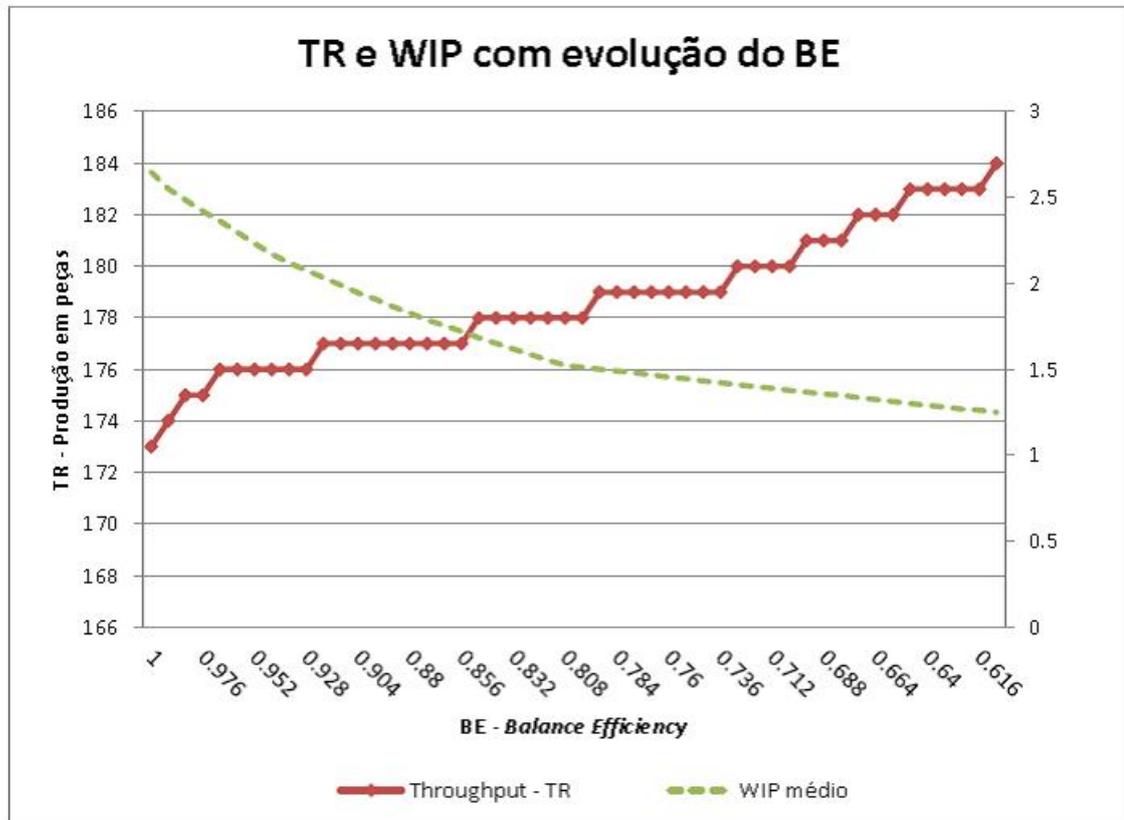


Figura 4.5: Desempenho da linha com diferentes configurações

É possível acompanhar pelo gráfico um incremento pequeno, mas gradativo do TR à medida que o linha vai sendo desbalanceada (BE se afastando do 100%, no eixo das abcissas). Observando o eixo secundário já se percebe, de forma mais significativa, uma redução do nível médio de estoque. Isso acontece porque a capacidade extra adicionada aos não gargalos permite um fluxo mais rápido de itens nestes pontos, reduzindo o acúmulo de material (WIP) e permitindo eventualmente um nível de produção maior.

Este resultado está consistente com estudos similares (HILLIER; SO, 1996; HILLIER; BOLLING, 1977; HUDSON; MCNAMARA; SHAABAN, 2015), que comparam o desempenho de linhas com configurações balanceadas e em *bowl shape*.

### 4.3 Modelagem em Excel - Simulação de Monte Carlo

Por ser um programa com muitos recursos visuais, a simulação através do *software* Witness permitiu visualizar o comportamento do WIP e do TR durante o experimento à medida em que novas configurações de capacidades eram testadas. Ao incrementar a capacidade produtiva de algumas estações de trabalho, ampliando a diferença entre os gargalos e não gargalos, o efeito nocivo da variabilidade dos tempos de ciclo acabava sendo atenuado, diminuindo os níveis médios do WIP e melhorando o fluxo.

Mas como comparar as diferentes combinações de configuração e de níveis de balanceamento (BE) de uma forma mais prática? Rodar diversos modelos no Witness, com variadas configurações de distribuição de capacidade e diversos níveis de balanceamento, somente para obter os resultados de TR e WIP resultariam em um trabalho hercúleo e ineficiente. A visualização direta dos comportamentos dos estoques e do fluxo de materiais, sem uma ferramenta que pudesse comparar os resultados apresentados, em muito pouco ou nada contribuiria para responder as questões da tese.

Desta forma, foi desenvolvido um modelo computacional utilizando-se de Simulação de Monte Carlo em Excel para a linha de produção seriada de cinco estações de trabalho. A Simulação de Monte Carlo foi desenvolvida no século XIX, sendo que os matemáticos John Von Newman e Stanilaw Ulam são considerados seus principais autores. O nome faz referência aos famosos cassinos da cidade de Monte Carlo, por conta da aleatoriedade presente na técnica.

De acordo com [Donatelli e Konrath \(2005\)](#), algumas vezes, devido à complexidade de um sistema, é possível que a resolução analítica do modelo se torne inviável. Nestes casos, a simulação computacional pode ser considerada uma ferramenta de grande valia na obtenção de uma resposta para um problema particular. Quando o modelo envolve amostragem aleatória de uma distribuição probabilística, o método é designado Simulação de Monte Carlo ou Método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo, de acordo com [Binder \(2006\)](#), emprega algoritmos que se utilizam de números aleatórios para criar convergências de estimativas estatísticas. Estas estimativas podem ser desde soluções para problemas determinísticos, avaliações de integrais com dimensões altas ou médias de processos aleatórios. Embora abordagens analíticas continuem sendo propostas para sistemas complexos, ainda existem muitos problemas para os quais procedimentos analíticos ainda não o resolvem. Com a expansão do uso de computadores, os cálculos de Monte Carlo tem sido bastante úteis.

Obviamente, como em qualquer modelagem, existem limitações e riscos. Como todos os métodos que se utilizam de computadores para gerar números envolvem algoritmos finitos,

os quais conseqüentemente são passíveis de falhar em alguns testes para aleatoriedade, as sequências geradas por estes computadores são chamadas de números pseudoaleatórios. Ainda assim, a Simulação de Monte Carlo tem sido empregada com sucesso para a solução de uma vasta gama de problemas.

O modelo em Excel é dividido em três módulos. O primeiro se destina à geração dos números aleatórios. No segundo módulo são simuladas as seis diferentes configurações de capacidade variando o nível de balanceamento (BE), de forma a se comparar o desempenho em termos de TR e WIP. O terceiro módulo se dedica à inserção dos *mix* variados de produtos, de forma a testar o desempenho de cada configuração e comparar com as demais.

### 4.3.1 Teste do Modelo Computacional

Antes de apresentar o modelo de simulação desenvolvido em Excel para o desenvolvimento do experimento, faz-se necessário verificar o seu comportamento e testar o funcionamento da programação.

Para o teste do modelo computacional, foram realizadas simulações com as mesmas configurações de tempo, número de interações e características de linha utilizadas no sistema Witness. Em encontrando no modelo em Excel resultados semelhantes aos encontrados com o Witness, torna-se possível dar continuidade ao experimento.

Foram gerados 30 valores de produtividade média e estoque médio para uma configuração de linha aleatoriamente escolhida, em ambos os sistemas, o Witness e o modelo proposto do Excel. Todos os valores encontrados estão no Apêndice A.2, resultando em uma média conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparação Witness e Modelo em Excel

	Witness	Excel
Média TR	1.208,3	1.212,3
Média WIP	12,23	13,63

Como a geração de números aleatórios do Excel difere da empregada pelo Witness, assim como outras estruturas dos programas (como critérios de arredondamento, etc.), não é esperado que os valores dos simuladores sejam idênticos. Porém, há uma forte semelhança entre os valores de TR e os padrões de comportamento do estoque, o que nos permite continuar nas próximas etapas do experimento com o simulador em Excel. A sua estrutura de funcionamento e os seus módulos serão apresentados nas seções seguintes.

### 4.3.2 Módulo gerador de dados aleatórios

O objetivo do módulo gerador de dados é o de oferecer opções para a distribuição de probabilidade a ser utilizada na simulação do processo. A escolha das distribuições que podem ser utilizadas foi feita com base na revisão de literatura, que identificou a utilização das distribuições apresentadas na Tabela 2.6.

A tela de abertura se apresenta como na Figura 4.6.



Figura 4.6: Tela de abertura do módulo gerador de dados

Nesta tela de entrada é escolhida a opção de função de distribuição de probabilidade que irá gerar os números aleatórios. Escolhida a função, é aberta outra tela, onde serão inseridos os valores dos parâmetros utilizados para a geração dos dados. Assim, por exemplo, escolhida uma função normal, deve-se inserir os valores de média e desvio padrão, escolhida uma exponencial, o valor de  $\lambda$  e assim sucessivamente.

Esta próxima tela está exibida na Figura 4.7.

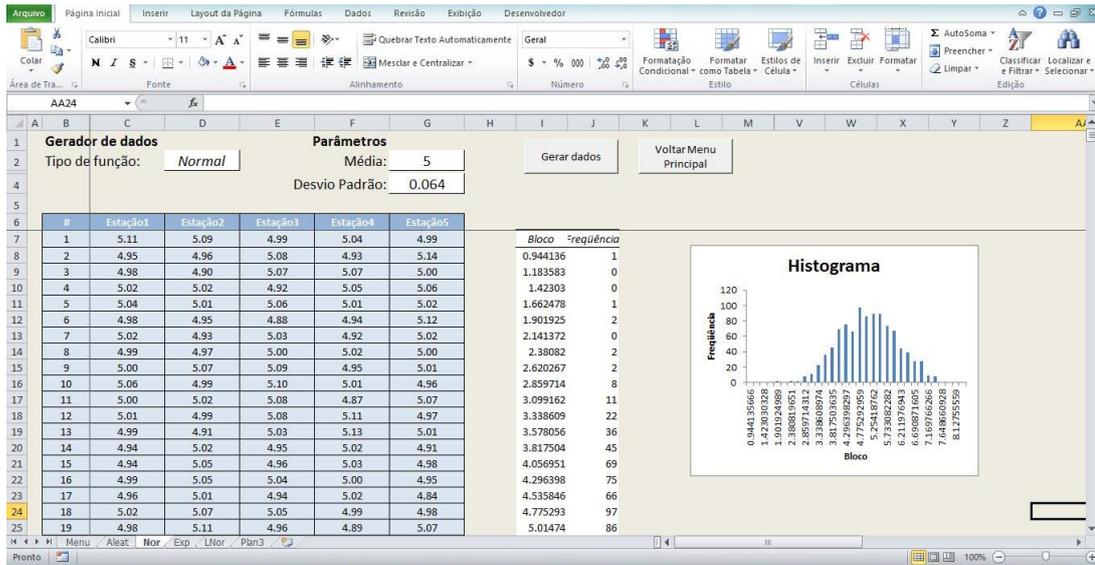


Figura 4.7: Tela de geração de dados

### 4.3.3 Módulo das configurações de capacidade

Neste módulo são inseridos os dados aleatórios obtidos do gerador de dados, de forma representar um processo produtivo de cinco estações de trabalho. Para os dados aleatórios inseridos, são então calculados os valores de produção de cada configuração de linha, podendo ser alterado o nível de desbalanceamento (BE) desde a linha totalmente balanceada até um nível de BE igual a 75%.

A tela principal deste módulo fornece os dados de entrada da configuração e o valor do BE a ser aplicado, com uma barra de rolagem. A Figura 4.8 apresenta um exemplo desta tela.

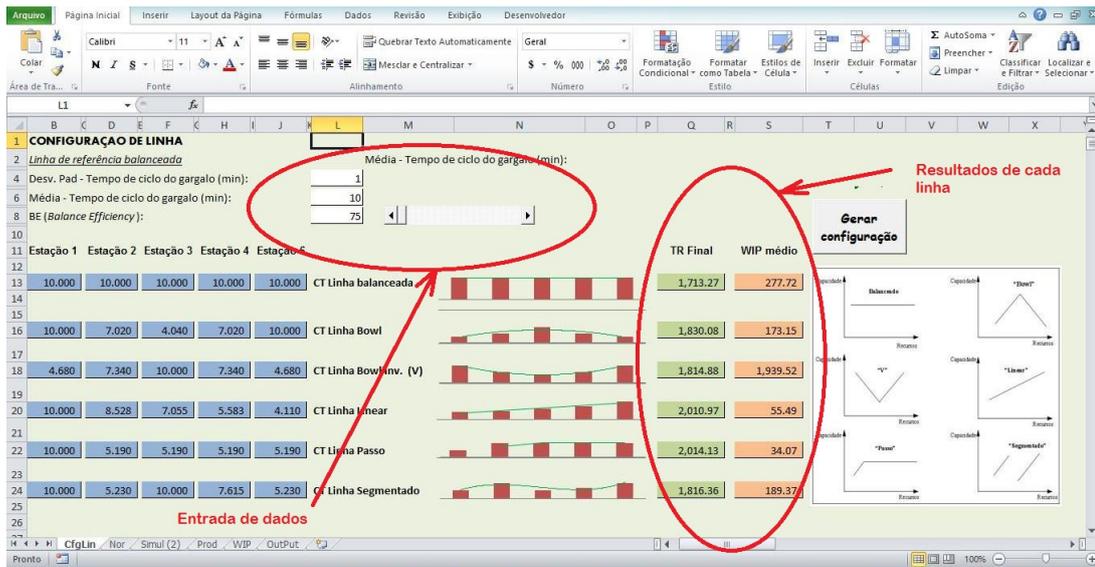


Figura 4.8: Tela principal do simulador de configurações

Na Figura estão destacados os campos de entrada de dados, a barra de rolagem e os campos de saída dos valores de TR e WIP ao final de 2.000 interações. Além destas informações, ao variar o valor do BE na barra de rolagem, um gráfico de barras ao lado de cada configuração representa o nível de desbalanceamento e o formato da distribuição de capacidade.

Duas outras planilhas apresentam gráficos comparativos da evolução do TR e WIP médios por interação para cada configuração. Estes gráficos são exibidos na seção de análise de resultados, juntamente com a avaliação dos desempenhos.

#### 4.3.4 Considerações sobre o impacto dos mix produtivos nas configurações de capacidade

Como o próximo módulo da simulação visa instrumentar a análise dos efeitos do *mix* produtivo com as diferentes configurações de capacidade, faz-se mister detalhar pontos que são componentes importantes do modelo utilizado na tese.

Com relação aos *mix* inseridos na linha de produção, o modelo permite classificá-los de acordo com os seguintes critérios:

- Impacto do *mix*, nos tempos de processamento do *mix* nas estações de trabalho;
- Efeito do *mix* na mudança do perfil de capacidade da linha;

- c) Efeito do *mix* na posição do gargalo.

O primeiro critério, o impacto do *mix*, está relacionado ao grau de variação dos tempos de ciclo, ao número de estações afetadas e ao efeito positivo ou negativo da variação com a introdução do *mix*. Para o modelo, este é um indicador destacado, de forma a poder comparar *mix* com diferentes graus de impacto em cada configuração de linha. Para tanto será estabelecido um indicador para este critério a seguir.

Com relação ao efeito do *mix* no perfil, são utilizados gráficos para acompanhar como a introdução do *mix* altera desempenho de cada configuração de capacidade.

#### 4.3.4.1 *Indicador de impacto de mix*

A fim de melhor analisar o impacto do *mix* produtivo nas configurações de capacidade, é determinado um indicador para medir a diversidade de *mix* produtivos e seu potencial de alteração da configuração inicial. Como não foi identificado na literatura um indicador que pudesse mensurar o grau de variação do impacto do *mix* produtivo na capacidade, é proposta a estruturação de uma variável com esta finalidade.

O primeiro passo para a formulação do indicador é o estabelecimento do comportamento esperado da variável à medida em que diferentes configurações de *mix* são utilizadas na linha. A partir deste comportamento esperado, determinam-se as premissas de funcionamento do indicador. Foram as seguintes as premissas estabelecidas para o indicador de impacto do *mix* produtivo:

- a) Ser um índice adimensional;
- b) Atingir o valor zero para uma configuração de referência em que haja somente um produto compondo o *mix* produtivo, ou seja, uma linha dedicada;
- c) Atingir valores positivos, para configurações de *mix* que tragam aumento de produtividade para a linha de produção e negativos na situação oposta;
- d) Se distanciar do zero quanto maior for o número de produtos no *mix* cujas taxas produtivas nas estações de trabalho se diferenciam da capacidade de referência da linha dedicada;
- e) Se distanciar do zero com alterações mais significativas nas capacidades produtivas quando comparadas à capacidade de referência.

Como as alternativas de *mix* produtivos pode ser bem diversificadas, optou-se inicialmente por não limitar os valores possíveis do indicador, que podem variar indefinidamente (de  $-\infty$  a  $+\infty$ ).

Assim, o indicador deve ser composto pelas capacidades médias de trabalho de cada produto em cada estação de trabalho da linha de produção. Estas capacidades são representadas pelo tempo de ciclo do produto  $i$  na estação de trabalho  $j$ , designado  $C_{ij}$ . As capacidades produtivas serão comparadas a um valor de referência  $C_j$  para cada estação de trabalho  $j$ . Devem estar presentes também os valores de proporção do produto no *mix* produtivo,  $p_i$ .

Desta forma, o seguinte indicador é proposto, sendo designado *IM* - Impacto do Mix Produtivo:

$$IM = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_i * \frac{(C_j - C_{ij})}{C_j}$$

Considerando:

- a)  $n$  - Número de estações de trabalho
- b)  $m$  - Quantidade de produtos do mix produtivo
- c)  $C_{i,j}$  - Tempo de ciclo médio do produto  $i$  na estação de trabalho  $j$ ;
- d)  $C_j$  - Tempo de ciclo de referência de linha dedicada na estação de trabalho  $j$ ;
- e)  $P_i$  - Proporção do produto no *mix* produtivo, em percentual.

Quando há somente o produto referência na linha dedicada,  $C_{ij}$  se iguala a  $C_j$ , resultando em um IM igual a zero. À medida em que é adicionado ao mix um produto que apresente uma melhor relação de capacidade produtiva, quando comparado ao tempo de referência, com menores tempos de ciclo nas estações, o resultado do numerador tende a crescer positivamente. Da mesma forma, quando a relação se dá com maiores tempos de ciclo, reduzindo a taxa de produção, o resultado de *IM* tende a se distanciar do zero, negativamente.

Tomando como exemplo a configuração utilizada na simulação de uma linha de produção com cinco estações de trabalho em série, a capacidade de referência é representada por uma linha dedicada a um produto com tempo de ciclo igual 10 minutos em cada uma das cinco estações de trabalho. Ao incluir um novo produto no *mix* com tempo de ciclo

menor, o  $IM$  deve atingir valores positivos. De forma inversa,  $mix$  com tempos de ciclo maiores trazem valores negativos. Assim, os valores positivos de  $IM$  representam situações de  $mix$  favoráveis, onde a produtividade deve ser melhorada, enquanto os valores de  $IM$  negativos, o oposto.

A seguir são apresentados alguns exemplos de configurações de  $mix$  e resultados do indicador  $IM$ . A Tabela 4.3 apresenta a configuração de referência, com toda a linha de cinco estações de trabalho com um tempo médio de dez minutos. Como a linha é dedicada, resulta  $IM$  igual a zero. Em seguida a Tabela 4.4 exemplifica uma configuração em que o  $mix$  é dividido com 50 % na configuração referência e 50 % com um produto em que o tempo de ciclo da estação 4 é reduzido para 7,5 minutos.

Tabela 4.3: Configuração de referência

$P_i$	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	$IM$
1	10	10	10	10	10	0,00

Tabela 4.4: Configuração com  $IM$  positivo

$P_i$	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	$IM$
0,5	10	10	10	10	10	
0,5	10	10	10	7,5	10	0,125

No exemplo da Tabela 4.5 é montada uma configuração na qual 50 % do  $mix$  é utilizado para um produto que dobra o tempo de ciclo em todas as estações, resultando em um  $IM$  negativo.

Tabela 4.5: Configuração com  $IM$  negativo

$P_i$	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	$IM$
0,5	10	10	10	10	10	
0,5	20	20	20	20	20	-2,5

Na configuração da Tabela 4.6, é introduzido no  $mix$  um produto que tem os mesmos dez minutos em todas as estações, porém não passa pelo processo produtivo da primeira estação, reduzindo o tempo necessário de processo e resultando em um  $IM$  positivo.

Tabela 4.6: Configuração com IM negativo

$P_i$	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	$IM$
0,5	10	10	10	10	10	
0,5		10	10	10	10	0,5

Desta forma, o indicador aponta para a interferência da introdução de novos itens no *mix* e o efeito nas capacidades adicionadas. Contudo, sozinho ainda é insuficiente para avaliar os impactos do mix produtivo em linhas desbalanceadas. Isso porque o  $IM$  trata de forma igual as capacidades das estações de trabalho, independente de sua situação como gargalo ou não gargalo. O indicador também não diferencia outras variáveis ligadas à distribuição das capacidades, como o formato da distribuição de capacidades, a possível mudança de posição do gargalo na linha produtiva ou os tempos de *set up* entre os processos.

Outro ponto que o indicador não leva em consideração é o valor econômico dos itens inseridos no *mix* produtivo, sejam em custo de produção, em preço ou valor percebido pelo cliente. A distinção do valor dos itens não é tratada nesta avaliação, por estar mais relacionada a questões mercadológicas.

#### 4.3.5 Módulo dos mix produtivos nas configurações de capacidade

O terceiro módulo da simulação se destina a identificar como se comportam as diferentes configurações de distribuição de capacidade quando submetidas a *mix* diversificados de produtos. As configurações de capacidades testadas são as mesmas analisadas na etapa anterior: balanceada, *bowl*, *bowl* invertido ou em 'V', linear ascendente, passo e segmentada, seguindo as categorias estabelecidas por Fry e Russell (1993).

Foram geradas, aleatoriamente, 30 configurações de *mix* produtivos. Estas configurações são, sem seguida, classificadas e carregadas no modelo. Assim, na tela principal do modelo é possível selecionar o valor de impacto de *mix* a partir da rolagem de uma lista classificada por ordem crescente de  $IM$  (impacto de *mix*). Selecionado o  $IM$ , o modelo apresenta os efeitos percentuais do *mix* de cada produto em cada estação de trabalho e os gráficos de evolução de TR e WIP médios.

A Figura 4.9 apresenta a tela principal deste módulo.

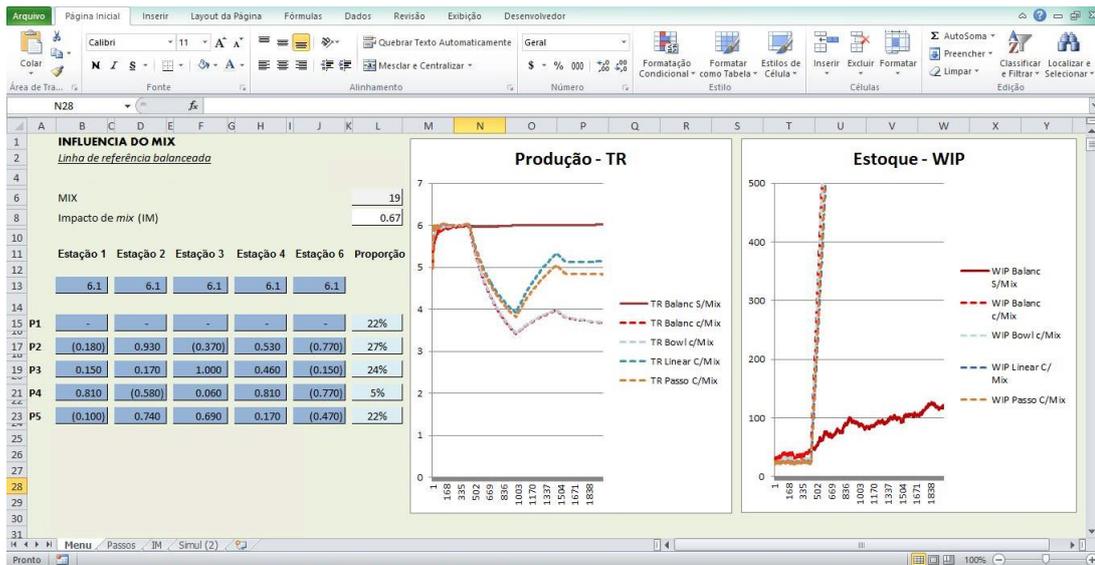


Figura 4.9: Tela principal do módulo de Mix e configurações

A parte esquerda da tela apresenta a distribuição de capacidade de referência da linha balanceada e o impacto na capacidade do *mix* de produtos, com o relativo valor de IM. Os dois gráficos à direita apresentam a evolução do desempenho do TR médio por interação e WIP médio por interação.

#### 4.4 Resultados encontrados

Nesta seção os resultados do simulador são apresentados em dois blocos: no primeiro são analisados os resultados das diferentes configurações, no segundo, os resultados com a interferência do *mix*.

Em todos os tratamentos, os dados constituem 2.000 interações no modelo, de forma a apresentar uma série de tamanho suficiente para se mostrar representativa. Isto porque a depender do volume de estoque inicial, é possível que haja instabilidades no fluxo da linha, sendo necessário um período até a estabilização do nível de fluxo.

Este comportamento pode ser visualizado na Figura 4.10. Na parte superior da figura é apresentado um gráfico ilustrativo da evolução do TR por interação das configurações iniciadas com estoque zero em todas as estações. No gráfico inferior, o estoque inicial é igual à taxa de produção média. Para melhor visualização, foram excluídas as legendas dos dois gráficos.

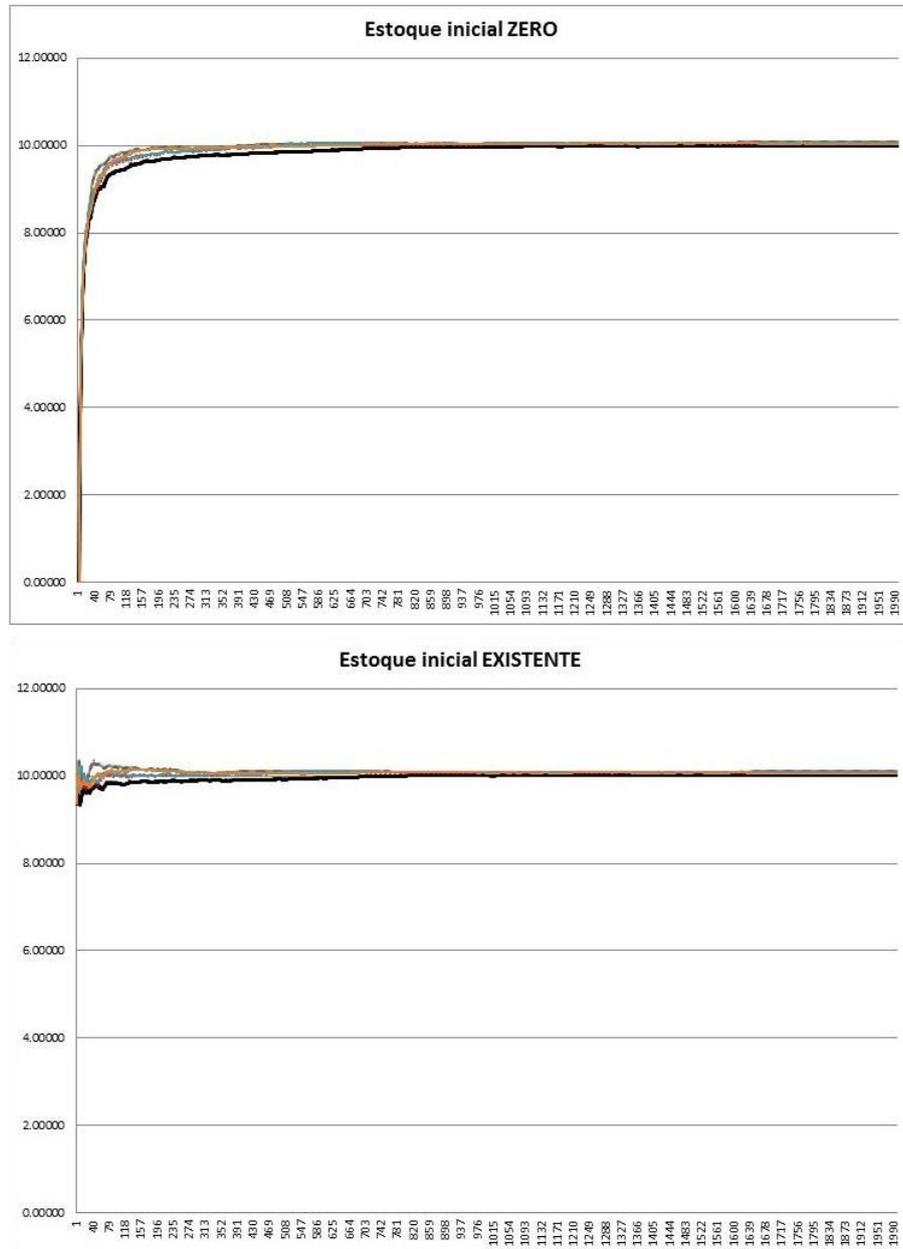


Figura 4.10: Efeito do estoque inicial na evolução do TR

Observa-se que com o estoque inicial zero o TR tende também é iniciado zerado, subindo à medida que as interações são realizadas. Quando o estoque inicial já existe em volume razoável em todas as estações, a evolução do TR é diferente. Os resultados iniciais oscilam e vão convergindo até se estabilizarem em um nível semelhante ao da figura superior.

#### 4.4.1 Resultados de TR e WIP com diferentes configurações

A primeira avaliação a ser feita através dos testes é a observação gráfica. Através de gráficos do comportamento dos objetivos de desempenho da linha é possível identificar comportamentos típicos e compreender alguns fenômenos.

Com a finalidade de simplificar a visualização, já que são mais de três configurações de capacidade utilizadas, serão separados dois gráficos para cada variável de resposta. Em um gráfico é apresentada a configuração balanceada e duas outras (*bowl* e linear), enquanto no outro é mantida a balanceada, como referência, com as demais (segmentada e passo).

A Figura 4.11 apresenta o gráfico com um exemplo da evolução de TR comparando as linhas com os mesmos valores de entrada para as configurações balanceada, linear e *bowl shape*. O índice de balanceamento (BE) utilizado para o *bowl shape* e linear é de 80%.

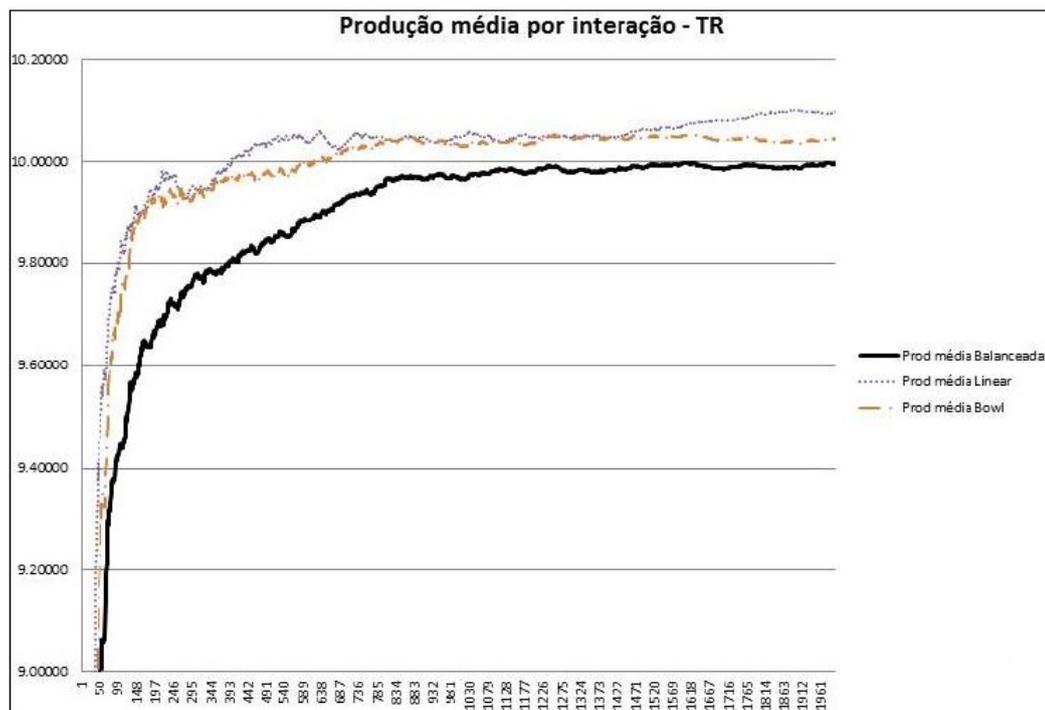


Figura 4.11: Comparação TR: Balanceada, *Bowl* e Linear

Este gráfico apresentou comportamento similar em todas as simulações realizadas: a linha desbalanceada apresentando valores abaixo das configurações desbalanceadas (*bowl* e linear). A diferença entre a linha balanceada e as outras configurações torna-se mais acentuada quanto maior for o desbalanceamento (menor o índice BE). Na comparação direta entre as linhas desbalanceadas, a configuração linear tem desempenho de TR na maior parte das vezes maior do que o resultado de TR da configuração em *bowl*. Porém

este comportamento não é tão evidente, havendo muitos momentos em que os valores são muito próximos e até instantes em que a configuração *bowl* produz valores de TR maiores que a linear.

A Figura 4.12 apresenta a mesma comparação, desta vez entre as configurações balanceada, segmentada, passo e *bowl* invertido. A escala do eixo vertical teve seu valor mínimo aumentado para melhor verificar as diferenças entre os comportamentos.

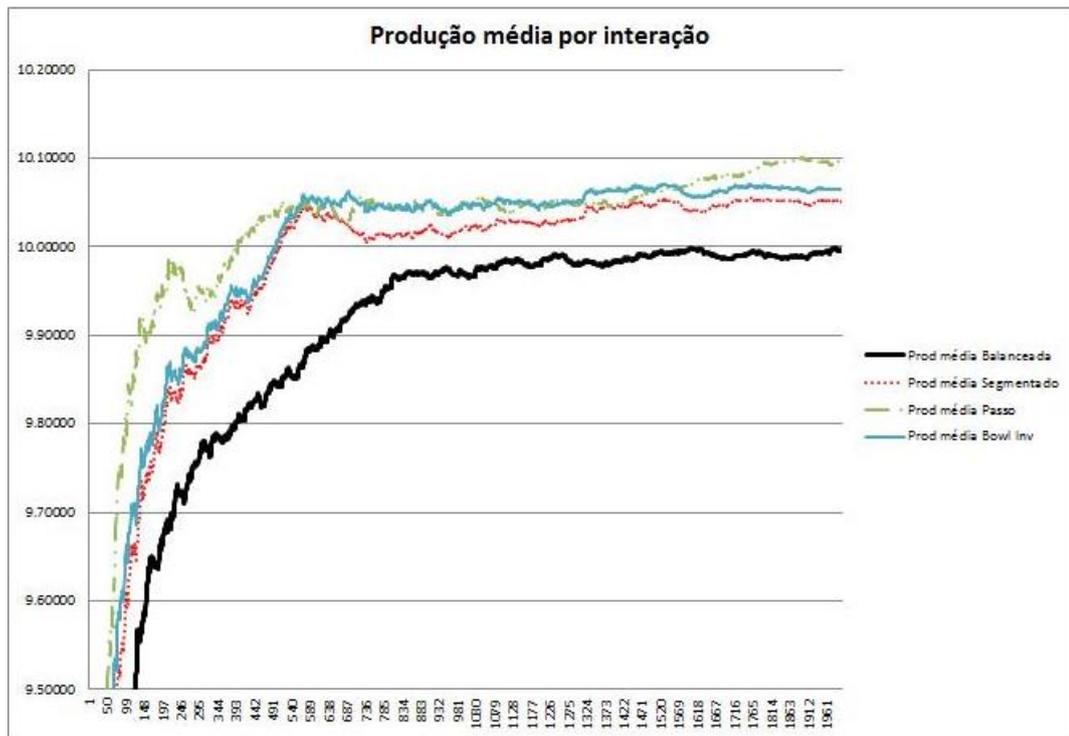


Figura 4.12: Comparação TR: Balanceada, Passo, Segmentado e *Bowl* invertido

Novamente os valores de TR da configuração balanceada estão abaixo das demais configurações. Mais à direita do gráfico, quando os resultados de TR começam a se estabilizar, os resultados mais altos são da configuração em passo, seguidos da *bowl* invertido, segmentado e balanceada. Da mesma forma que na comparação anterior, os comportamentos não são sempre estes, com os valores das configurações desbalanceadas se alternando em alguns momentos, porém com valores consistentemente superiores aos da configuração balanceada.

Quando realizada esta mesma comparação com o comportamento dos estoques em processo (WIP), os resultados são mais evidentes. A Figura ilustra o resultado deste mesmo exemplo.

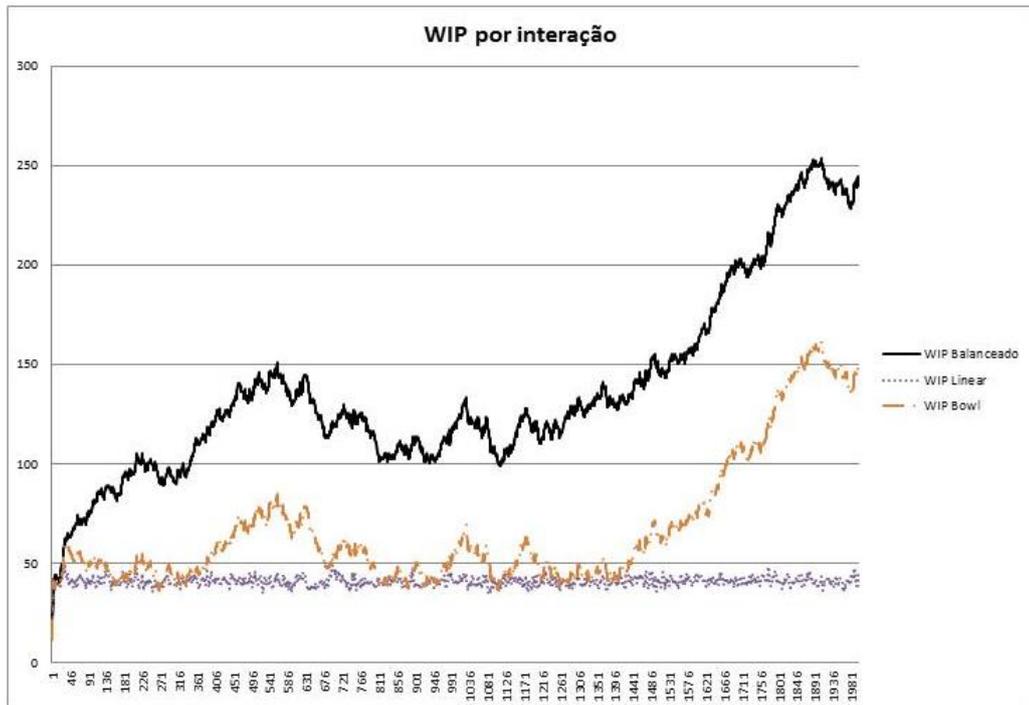


Figura 4.13: Comparação WIP: Balanceada, *Bowl* e Linear

O comportamento do WIP, diferentemente do comportamento de TR, não encontra uma tendência de estabilização. Devido à variabilidade dos processos, os estoques apresentam um comportamento oscilatório, sem um padrão claro à medida que as simulações eram realizadas. Contudo, quando comparados os desempenhos entre as configurações, o resultado é similar ao encontrado em TR: as configurações desbalanceadas apresentam níveis de estoques consistentemente menores que os presentes em configurações balanceadas. Novamente, a configuração em passo apresenta, na maior parte das vezes, valores de WIP melhores (menores) que a configuração em *bowl*, tendo também menor amplitude de variação.

A Figura 4.14 apresenta os resultados de WIP das demais configurações desbalanceadas, quando comparadas com a linha de referência, balanceada.

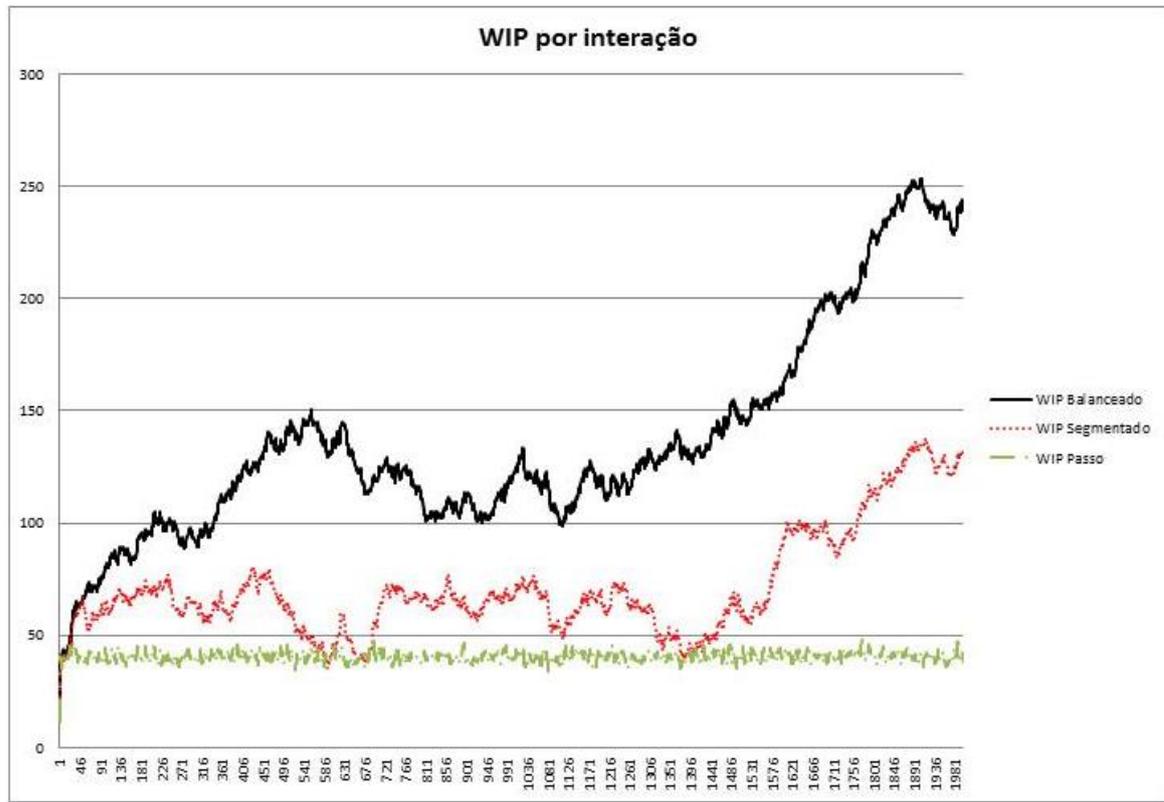


Figura 4.14: Comparação WIP: Balanceada, Passo, Segmentado e *Bowl* invertido

O comportamento do gráfico apresenta também valores de WIP das configurações desbalanceadas menores que os das configurações balanceadas, sendo a configuração em passo de melhor desempenho.

Este desempenho melhor (TR ligeiramente maior e WIP menor) das configurações desbalanceadas pode ser explicado pelo excedente de capacidade das linhas desbalanceadas. No momento em que há uma folga de capacidade em estações posteriores ao gargalo, o fluxo de produtos sofre menos interrupções, as quais provocariam elevações momentâneas dos níveis de estoque. Quando estas interrupções se tornam mais frequentes, maiores são as chances de provocarem paradas nos gargalos, que acabam por reduzir o nível de estoque.

Desta forma, quando as configurações de distribuição de capacidade apresentam situações em que há uma ou mais estações com capacidades iguais ou próximas à capacidade do gargalo em posições à jusante do gargalo, a probabilidade de ocorrer uma situação de bloqueio (quando a produção do gargalo é maior que a da estação à montante) é menor. Da mesma forma, a probabilidade de parada do gargalo por falta de matéria-prima, quando a estação à sua montante tem uma produção menor, é menor quanto maior for o excesso de capacidade dos não gargalos à montante.

#### 4.4.1.1 Teste de ANOVA para configurações de TR e WIP

Com a finalidade de testar a afirmativa de que as configurações de distribuição de capacidade possuem desempenhos significativamente diferentes, em termos de TR e WIP, é feito uma teste de ANOVA.

ANOVA, ou análise de variância, é um método de se testar a igualdade de três ou mais médias populacionais através da análise de variâncias amostrais. As suposições inerentes a este método são as seguintes (TRIOLA, 2005):

- a) As populações tem distribuições que são aproximadamente normais;
- b) As populações tem a mesma variância ou desvio padrão;
- c) As amostras são amostras aleatórias simples. Isto é, amostras de mesmo tamanho e tem a mesma probabilidade de serem selecionadas;

Foi realizado um levantamento de 30 rodadas da simulação sem a interferência de *mix* e com valor de BE fixo de 75%. Os valores utilizados para a simulação e as suas distribuições de frequência estão no Apeêndice A.3.

Como será feita a análise ANOVA de um critério, outra premissa é de que as diferentes amostras são de populações categorizadas de apenas uma maneira. Como exemplo, a distribuição de frequência das médias de TR para a distribuição de *bowl shape* encontra-se representada na Figura 4.15 e aponta que se assemelha ao formato de uma normal, uma das premissas para a utilização da ANOVA.

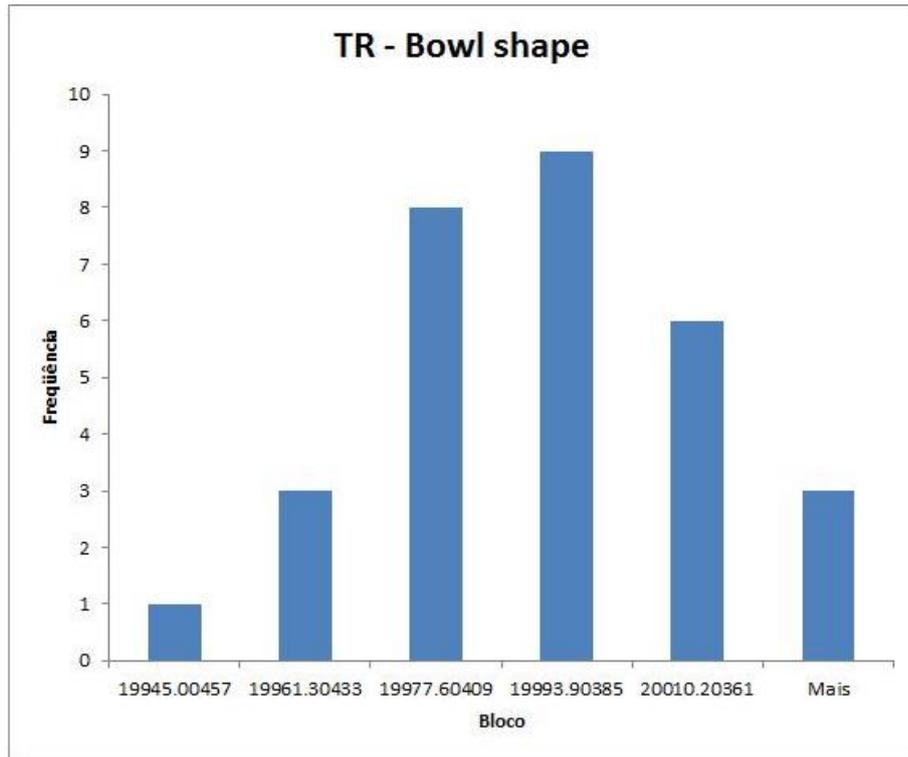


Figura 4.15: Histograma valores de TR da configuração em *bowl shape* para ANOVA

A Figura A.1 apresenta um gráfico Normal Quantil para a distribuição de frequência dos valores de TR utilizados no experimento. Em um gráfico Normal Quantil, a linearidade dos pontos sugere que os dados estão normalmente distribuídos.

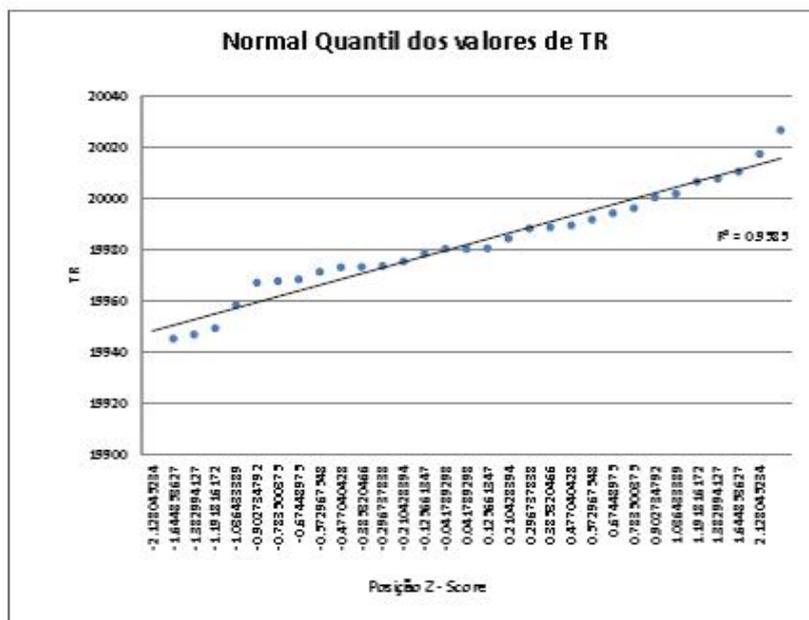


Figura 4.16: Normal Quantil dos valores de TR da configuração em *bowl shape*

O teste de ANOVA de um critério foi realizado com o software Excel para os dados de TR, com um valor de alfa de 0,05 (intervalo de confiança de 95%) e a hipótese de que as médias são semelhantes, com os resultados exibidos na Figura 4.17.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
TR - Balanceado	30	598297.748	19943.2583	231.076744
TR- Bowl	30	599487.81	19982.927	408.72321
TR - Linear	30	600199.492	20006.6497	536.141199
TR - Passo	30	600199.492	20006.6497	536.141199
TR - Segmentado	30	599572.424	19985.7475	359.278282

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	80539.1726	4	20134.7931	48.6028189	7.0826E-26	2.43406514
Dentro dos grupos	60069.4584	145	414.272127			
Total	140608.631	149				

Figura 4.17: ANOVA dos valores de TR das diferentes configurações pelo Excel

O valor-P, ou valor de prova, destacado na Figura 4.17, foi muito inferior ao erro de 0,05, o que resulta na rejeição da hipótese nula do teste, ou rejeição da igualdade entre os grupos testados. A mesma conclusão pode ser obtida ao verificar que o valor de F apresenta um resultado bem superior ao F crítico. Significa que, com 95% de intervalo de confiança, os resultados de TR obtidos pelas configurações, pertencem a grupos diferentes.

Pela primeira tabela da Figura 4.17, é possível também perceber que as médias e variâncias das configurações linear e em passo estão muito próximas (neste caso iguais). Este resultado corrobora percepções da avaliação visual dos gráficos, já que em boa parte da simulação realizada, os valores de TR e WIP das configurações em passo e linear se superpunham.

Realizado o teste de ANOVA com os valores encontrados de WIP sob as mesmas configurações pelo Excel, com o resultado exibido na Figura 4.18.

Anova: fator único

## RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
WIP - Balanceado	30	2834.368332	94.4789444	287.4079788
WIP - Bowl	30	1816.274147	60.54247157	117.9196247
WIP - Linear	30	1202.787401	40.09291338	0.004144968
WIP - Passo	30	1202.670016	40.08900052	0.00407779
WIP - Segmentado	30	1833.822267	61.1274089	222.1071079

## ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	59412.30707	4	14853.07677	118.3619733	1.20717E-44	2.434065136
Dentro dos grupos	18195.84509	145	125.4885868			
Total	77608.15216	149				

Figura 4.18: ANOVA dos valores de WIP das diferentes configurações pelo Excel

De forma semelhante, o valor-P, destacado na Figura 4.18, foi muito inferior ao erro de 0,05, o que resulta na rejeição da hipótese nula do teste, ou rejeição da igualdade entre os grupos testados. A mesma conclusão pode ser obtida ao verificar que o valor de F apresenta um resultado bem superior ao F crítico. Também é possível notar a semelhança entre os valores das configurações em passo e linear, porém, neste caso, os valores já demonstram pequena diferença. Significa que, com 95% de intervalo de confiança, os resultados de WIP obtidos pelas configurações, pertencem a grupos diferentes.

Os resultados da ANOVA reforçam a tese e as conclusões obtidas pela observação visual dos gráficos, de que o desempenho das linhas com configuração linear e em passo, nas condições testadas, apresentam melhor desempenho (menor WIP e maior TR) do que as demais configurações.

#### 4.4.2 Resultados com a introdução de *mix* diversificados

Através da análise visual dos resultados obtidos pelo simulador, foi possível identificar os comportamentos abaixo listados, relacionados ao comportamento do TR e WIP das linhas com a introdução de *mix* diversificados de produtos:

- A introdução de *mix* diversificados de produtos altera a configuração de balanceamento da linha, posto que os tempos de processo para cada estação de trabalho são geralmente modificados;
- Mesmo em situações nas quais o impacto do *mix* é positivo, é possível que o resultado

final da operação da linha resulte em TR mais baixo e maior estoque;

- c) A produtividade da linha é diretamente influenciada pelo tempo de ciclo do gargalo após a introdução de cada item do *mix*. Assim, Quando a introdução do item no *mix* faz com que a estação de trabalho com menor capacidade, o gargalo, tenha seu tempo de ciclo diminuído, o TR da linha é melhorado. Se o tempo de ciclo no gargalo é aumentado, o TR da linha é reduzido;
- d) Quando a introdução do item no *mix* não resulta em mudança da posição relativa do gargalo na linha, isto é, o gargalo é mantido no mesmo lugar, o impacto no estoque médio é menor;
- e) Em maior parte das situações a configuração de capacidade em passo mantém um resultado igual ou melhor em termos de TR e WIP, quando comparadas às demais configurações testadas;
- f) Com a introdução do *mix*, a configuração em passo tende a se diferenciar mais da linear;
- g) Em algumas situações, as configurações desbalanceadas em *bowl shape* ou segmentadas podem apresentar melhores resultados de TR do que a configuração linear ou em passo, mas, geralmente, a configuração de pior desempenho com a introdução do *mix* nas condições apresentadas é a configuração balanceada.

Os resultados encontrados evidenciam a afirmação da tese, de que as distribuições de capacidade desbalanceadas de formato linear ou em passo são menos atingidas pela utilização de *mix* diversificados, apresentando maior taxa de produção e menor nível de estoque, para configurações de linhas de produção discretas, em série, com até cinco estações de trabalho.

## Validação e análise de viabilidade

Algo deve mudar para que tudo continue como está.  
(Giuseppe Tomasi di Lampedusa)

Neste capítulo é feita a aplicação do modelo computacional desenvolvido para simulação de distribuição de capacidade produtiva sobre uma linha de produção real, com dois objetivos. O primeiro, de validar a utilidade do modelo, verificando se os resultados encontrados empregando-se a simulação computacional aplicada na pesquisa está coerente com os dados reais obtidos em levantamento de campo. O segundo, de analisar um problema real de configuração de linha que se utiliza de *mix* diversificados e propondo alternativas para sua otimização.

Adicionalmente, é feita uma análise de viabilidade da implementação da proposta de distribuição de capacidade, utilizando-se de um roteiro baseado na contabilidade de ganhos.

### 5.1 Aplicação do experimento

O processo produtivo escolhido para a aplicação do modelo computacional desenvolvido é o de uma linha de produção de guardanapos embalados e personalizados de papel. A composição e estrutura da linha está representada na Figura 5.1.



Figura 5.1: Representação de processo - guardanapos embalados

Para o processo de fabricação de guardanapos embalados de papel são utilizadas duas matérias-primas; o papel monolúcido (Monol), utilizado na embalagem do guardanapo, e o papel crepado (Crep), utilizado para a fabricação do guardanapo. As etapas produtivas

são cinco, cada uma considerada com o um processo independente e representada por uma estação de trabalho. As estações de trabalho são:

- a) Impressora, composta por uma impressora flexográfica responsável pela impressão no papel que fará a embalagem do guardanapo;
- b) Acompladora, composta por uma estação de acoplagem de material que confere uma cobertura plástica impermeável ao papel monolúcido após a impressão. Esta estação pode ser compartilhada com a atividade de impressão;
- c) Refiladora, composta por uma máquina que irá cortar as bobinas de papel monolúcido impressas e refazer em bobinas da largura necessária para a embalagem;
- d) Corte e dobra, composta por uma máquina de produção de guardanapos que promove o corte, a dobra e a montagem dos guardanapos;
- e) Embalagem, composta por operadores de embalagem que avaliam a qualidade do produto embalado, separam os guardanapos e fazem a embalagem final com as quantias pré-determinadas.

O processo é não cadenciado, sendo necessários estoques de material em processo entre as estações de trabalho (Est 1, Est2, Est3, Est4) de modo a evitar interrupções por falta de material. Estes estoques também tem tamanho limitados, condicionados à disponibilidade de espaço para a armazenagem do WIP.

Para efeito de simplificação não foram incluídos no modelo a geração de refugo advinda de cada uma das etapas produtivas nem a necessidade de insumos adicionais ao processo, como a tinta e os clichês para a impressão ou o plástico utilizado para a acoplagem. Estas exclusões não afetam o objetivo do modelo e, por isso, não são significativas.

Feito o levantamento dos dados de tempo de processo durante dois meses da linha de guardanapos embalados, já incluindo sete diferentes produtos que foram processados no período, foi primeiramente gerado um histograma das distribuições de cada estação e de todos os dados, apresentado na Figura 5.2.

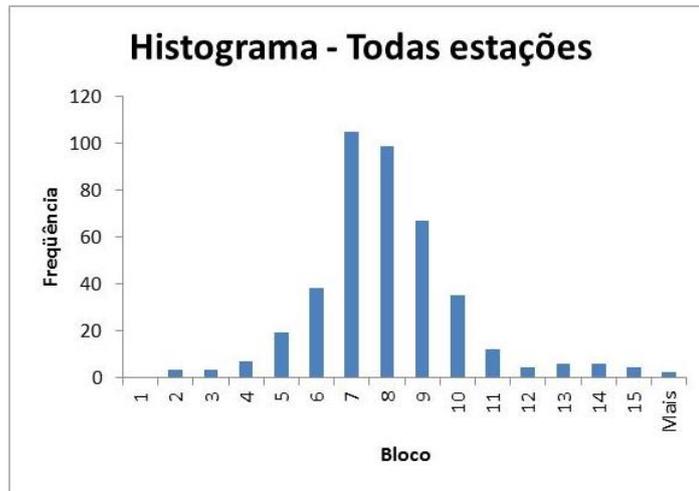


Figura 5.2: Histograma - Dados produção guardanapos embalados

Os dados, assim como os histogramas dos dados de cada estação de trabalho individualmente, estão no Apêndice A.5.

Assim, mantendo fixo o mix produtivo, serão geradas as configurações de desbalanceamento indicadas como de melhor desempenho no capítulo anterior. Estas configurações serão testadas no simulador, registrando os devidos valores de taxa produtiva (TR) e estoque em processo (WIP).

A Figura 5.3 apresenta o simulador com os dados históricos da da linhas de guardanapos embalados avaliada.

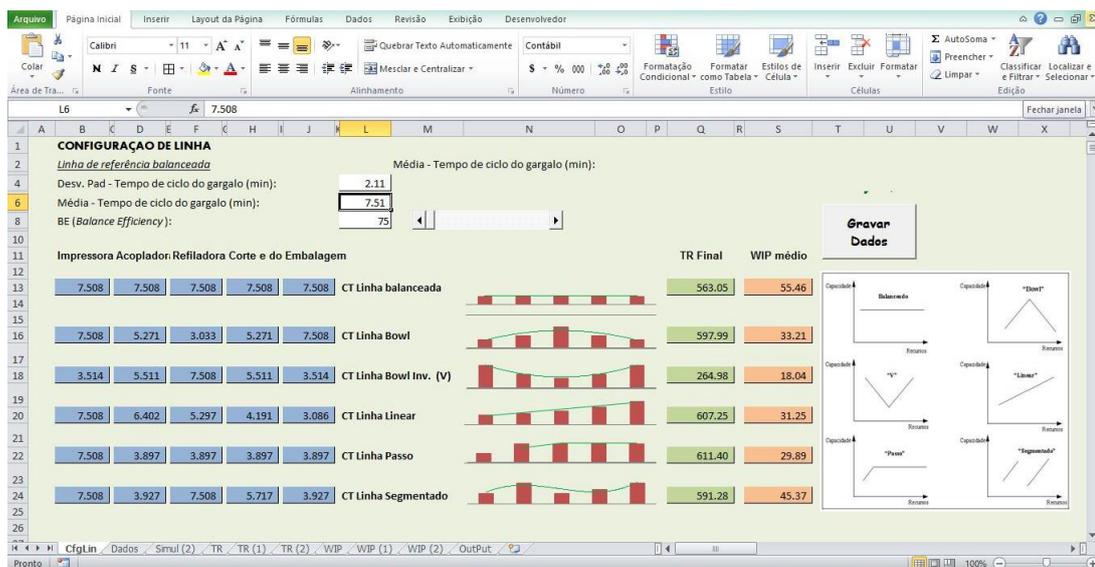


Figura 5.3: Simulação: produção de guardanapos embalados

A simulação apresentada sugere que a alteração da configuração de balanceada para passo com 75% de BE permite um incremento na faixa de 8.6% do nível de produção (de 563,05 para 611,40) e uma redução de 54% do nível de estoques (do valor de referência de 55,46 para 29,89). Seria a configuração com melhor desempenho, nestas condições da simulação.

Contudo, uma alteração de níveis de capacidade carece de investimentos em maquinário ou em contratação de pessoal. Desta forma, faz-se mister um estudo de viabilidade financeira para a tomada de decisão.

## 5.2 Análise de viabilidade

Nesta seção é proposto um roteiro para a análise de viabilidade de projetos de alteração de configurações de capacidade de linhas produtivas, sendo em seguida aplicado este roteiro para o caso em estudo.

A pergunta problema base para a análise de viabilidade é: dependendo do custo do estoque e do custo marginal para aumento de capacidade, por que não adicionar mais capacidade por meio de aquisição de equipamentos ou adição de mão-de-obra para reduzir o estoque de material em processo - WIP?

Como a simulação do estudo de caso apontou que, em determinadas condições, configurações desbalanceadas se mostram mais favoráveis para os objetivos de desempenho avaliados, pode-se assumir que, nestes casos, a capacidade extra nos centros não-gargalo está relacionada à redução no nível do WIP e a um pequeno incremento de TR. Desta forma, seria possível medir o impacto da redução do WIP no custo, do aumento do TR na receita, e comparar com o investimento a ser feito.

### 5.2.1 Roteiro para análise

A primeira verificação feita com a simulação é de que, em determinadas condições, existe uma relação entre o nível de desbalanceamento (medido pela eficiência de balanceamento *BE*) e uma redução do WIP e aumento de TR da linha. Assim, considerando que:

$$\overline{WIP} = f(BE)$$

Então como avaliar se a viabilidade desta mudança? De acordo com a Contabilidade de Ganhos, a premissa básica para a tomada de decisão sobre o investimento é se a mudança

irá melhorar o retorno de investimento (ROI) da empresa.

Pela contabilidade de ganhos:

$$ROI = \frac{(G - DO)}{I}$$

Sendo,

- a) G - Ganho;
- b) DO - Despesa Operacional;
- c) I - Investimento.

O Ganho representa a margem de contribuição do negócio, ou a soma de todas as receitas menos os custos totalmente variáveis (matérias-primas, insumos variáveis, etc.). Neste caso, apesar de verificado na simulação que o TR de uma linha é levemente melhorado com o desbalanceamento, para simplificar o modelo, será considerado que o Ganho não se altera com o investimento em capacidade.

A despesa operacional - DO é a soma de todos os custos fixos, como salário, aluguel, energia, etc. Aqui, são duas as possibilidades de efeitos sobre a DO com investimento em capacidade de não-gargalo. Na primeira situação, a DO permanece inalterada ou tem incremento desprezível com o aumento de capacidade. É quando o aumento se dá com a aquisição de um equipamento que não gere custos adicionais, além do investimento do equipamento, por exemplo. Já a segunda situação é quando o aumento de capacidade traz aumento de DO. Por exemplo quando, aumentamos a capacidade com mais operadores, aumentando a folha.

Já o investimento - I é constituído por todo aquilo que é comprado e utilizado para fazer a empresa produzir dinheiro e que pode posteriormente ser vendido, voltando a fazer dinheiro. São os ativos da empresa. Então fazem parte do investimento os estoques e os equipamentos da empresa, entre os outros ativos. Os dois devem ser influenciados pela mudança de capacidade. Se a compra de novos equipamentos representa um aumento do I, por outro lado, a redução do WIP irá representar uma redução do I.

Desta forma, o desbalanceamento da linha, ao se dar com aumento de capacidade nos não-gargalos, deve causar um impacto no I (investimento) e/ou na DO (despesa operacional), consequentemente alterando o ROI.

É esperado que o ROI depois da mudança ( $ROI_d$ ) seja maior do que o ROI antes da mudança ( $ROI_a$ ):

$$ROI_d > ROI_a$$

ou

$$ROI_d - ROI_a > 0$$

Desta forma, considerando:

- a)  $G_d$  - Ganho depois;
- b)  $G_a$  - Ganho antes;
- c)  $DO_d$  - Despesa Operacional depois;
- d)  $DO_a$  - Despesa Operacional antes;
- e)  $I_d$  - Investimento depois;
- f)  $I_a$  - Investimento antes;

É possível deduzir:

$$\frac{(G_d - DO_d)}{I_d} - \frac{(G_a - DO_a)}{I_a} > 0$$

Com as premissas de que o Ganho permanecerá inalterado e haverá uma variação na despesa operacional (incremento de  $DO = i_D$ ), com acréscimo de custo fixo de mão de obra, e no investimento (incremento de  $I = i_I$ ), com redução dos estoques, tem-se:

$$G_d = G_a$$

$$DO_d = DO_a + i_D$$

$$I_d = I_a + i_I$$

Vale aqui ressaltar que o incremento de DO ( $i_D$ ) deve ser um valor positivo, já que a DO

aumenta, porém o incremento de I ( $i_I$ ) deve ser um valor negativo. Isso porque espera-se uma redução no investimento para justificar a análise de viabilidade. Se houvesse manutenção do ganho, aumento da DO e aumento do I, imediatamente já seria possível descartar a viabilidade, mesmo sem uma análise mais aprofundada.

Substituindo então estas premissas, tem-se:

$$\frac{(G_a - DO_a - i_D)}{I_a + i_I} - \frac{(G_a - DO_a)}{I_a} > 0$$

$$\frac{(G_a - DO_a - i_D)}{I_a + i_I} > \frac{(G_a - DO_a)}{I_a}$$

$$(I_a)(G_a - DO_a - i_D) > (I_a + i_I)(G_a - DO_a)$$

$$I_a G_a - I_a DO_a - I_a i_D > I_a G_a - I_a DO_a + i_I G_a - i_I DO_a$$

Algebricamente, tem-se:,

$$-I_a i_D > +i_I G_a - i_I DO_a$$

$$-I_a i_D > +i_I (G_a - DO_a)$$

De forma que:

$$\frac{-i_D}{i_I} > \frac{(G_a - DO_a)}{I_a}$$

Simplificando, tem-se:

$$\frac{i_D}{i_I} < \frac{-(G_a - DO_a)}{I_a}$$

$$\frac{i_D}{i_I} < -ROI_a$$

Desta forma, a equação propõe que seja avaliado o investimento em capacidade adicional nos não gargalos pelo impacto nas despesas fixas, a DO - Despesa Operacional e nos ativos, o I - Investimento, comparando a sua relação com o retorno de investimento da empresa. Vale lembrar que o valor de  $i_I$  deve ser um valor negativo, pois é esperada uma redução no investimento.

Como o desejado é a melhoria do ROI, espera-se que o G aumente, reduza a DO e reduza o I. Quando o impacto é somente no I, como exemplo aumentando os ativos em máquinas e reduzindo os estoques, o que importa é que o total do I seja menor que o anterior. Quando há também um impacto na DO, aumentando algum custo fixo, é preciso que a redução do I compense o aumento da DO na comparação com o ROI anterior.

### 5.2.2 Viabilidade do estudo de caso

No caso em estudo, foi verificado que os custos de material em estoques são de R\$6,00 por quilo. Para a unidade avaliada, o estoque médio de material em processo nos últimos seis meses foi de 8.000 kg, resultando em um valor médio de R\$48.000,00 imobilizado em estoque.

Para o custo de incremento de capacidade é necessário avaliar a natureza de cada operação produtiva. As opções de incremento de capacidade, via de regra, se dão por:

- a) Aquisição de novos equipamentos, como no caso de compra de novas prensas de extrusão;
- b) Aquisição de subconjuntos adicionais, como no caso de compra de novos exaustores para ampliar a capacidade da unidade de resfriamento;
- c) Aumento da potência ou velocidade de parte do equipamento, por exemplo por meio do aumento da potência dos motores;
- d) Modificação no projeto do equipamento. Também conhecido como 'turbinamento' do equipamento, fazendo alterações no projeto que resultem em incremento de capacidade.

Devido à natureza do maquinário na produção de guardanapos embalados, é possível realizar pequenos incrementos de capacidade por meio de melhorias nas capacidades dos

motores e conjuntos de câmbio. Foi feito, então, um levantamento de custos para o incremento nas quatro últimas unidades produtivas, visando avaliar as opções de utilização de configurações de capacidade em passo e linear ascendente. O resultado das propostas para incremento de capacidade podem ser resumidos na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Custos de incremento de capacidade (R\$)

Incremento	Acopladora	Refiladora	Corte e dobra	Embalagem
10%	12.000,00	8.500,00	-	-
50%	25.000,00	20.000,00	35.000,00	2.500,00 (DO)

Estas opções de incremento de capacidade resultam na possibilidade de implementação das seguintes combinações de configurações:

- a) Passo. Com incremento de 50% nas quatro estações 2, 3, 4 e 5 (acopladora, refiladora, corte-dobra e embalagem), mantendo o gargalo na estação 1;
- b) Linear. Com as combinações de incremento de 10% ou 50% nas unidades 1 e 2 e ampliando em 50% a capacidade dos centros 3 e 4, mantendo o gargalo na estação 1;
- c) *Bowl*. Com as combinações de incremento nas unidades 2, 3 e 4, mantendo os gargalos nas unidades 1 e 5.

Estes cenários foram incluídos no simulador, de forma a calcular a viabilidade das alternativas. A Figura 5.4 apresenta o cenário da simulação.

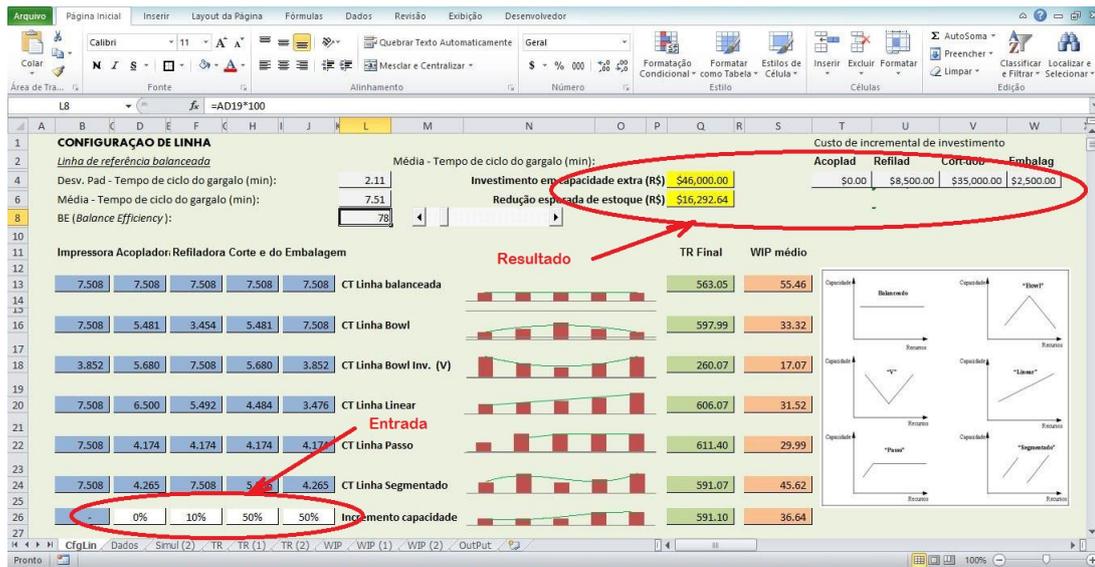


Figura 5.4: Tela de viabilidade para embalados

Nas células indicadas como entrada, destacadas em branco, é escolhida aplicação do investimento em capacidade, sendo calculado o valor do investimento e a expectativa de redução de estoque nas saídas assinaladas, destacadas em amarelo como resultado.

No caso avaliado, nenhum dos cenários se mostrou viável, visto que o investimento em capacidade extra se revelou maior do que a redução de custo de estoque a ser obtida. Cenários de empresas onde o valor agregado do material em estoque seja mais relevante e o custo do incremento de capacidade seja menor devem resultar em condições de maior viabilidade.

---

## Conclusão e considerações finais

---

Sem mudar nossos padrões de pensamento, não conseguiremos resolver os problemas que criamos através deles.

(Albert Einstein)

Este capítulo é estruturado em três partes principais. A primeira apresenta a discussão dos resultados encontrados na pesquisa, a resposta à pergunta da pesquisa, conclui os objetivos do trabalho e da tese propriamente dita. A segunda parte destaca as limitações do estudo, apontando em que situações podem ser utilizadas as conclusões do trabalho, justificando estas limitações e explicitando caminhos para reduzir os seus efeitos. A terceira e última parte aponta para possíveis direções de trabalhos futuros e apresenta as considerações finais.

### 6.1 *Discussão dos resultados*

Este trabalho buscou investigar o desempenho de diferentes configurações de capacidade na fabricação de *mix* diversificados de produtos, com a elaboração de um modelo computacional que pudesse apresentar e avaliar alternativas de configurações que proporcionem um desempenho maximizado da linha. Para tanto, apoiou-se em trabalhos desenvolvidos sobre distribuições de capacidade, recolhendo os conclusões já encontradas, assim como lacunas ainda abertas sobre o tema nos diferentes tipos de linhas produtivas.

Após um protocolo de revisão de literatura que buscou identificar os trabalhos mais relevantes, foi verificada uma carência de trabalhos referentes à utilização de *mix* diversificados de produtos e o desempenho das configurações. Foi realizado, então um planejamento de experimento buscando investigar o comportamento de linhas de produção discretas de até cinco estações de trabalho.

Decorrente da utilização inicial do *software* de simulação Witness, foi elaborado um modelo computacional em Excel, utilizando-se de Simulação de Monte Carlo, para investigar o comportamento de linhas sob um determinado espectro de condições.

O modelo permitiu avaliar o desempenho de diferentes configurações de capacidade, inicialmente variando o nível de eficiência de balanceamento (BE) de cada configuração e depois, com a inserção de um *mix* diversificado de produtos escolhido aleatoriamente.

Ao final da modelagem e dos experimentos, foi possível responder à pergunta do problema de pesquisa: como se dá a relação entre o as configurações de capacidade e o desempenho de linhas de produção com um *mix* diversificado de produtos? Na resposta, foi possível evidenciar que algumas configurações de distribuição de capacidade (configuração em passo e linear) reagem geralmente de forma melhor à introdução de *mix* variados de produtos. A aplicação do modelo permitiu verificar que o estoque em processo (WIP) apresenta um comportamento oscilatório imprevisível no decorrer das interações, mas que, em linhas gerais, a capacidade extra adicionada nas estações subsequentes ao gargalo (todas as estações das configurações em passo e linear) reduz o frequência de bloqueio do fluxo de materiais nos momentos em que a produtividade do gargalo supera a da estação à montante, o que diminui o estoque em processo resultante deste bloqueio e melhora o fluxo de materiais, aumentando a taxa produtiva (TR).

Os objetivos específicos foram todos alcançados por meio da metodologia proposta:

- a) Com base na revisão de literatura, foram estabelecidos os objetivos de desempenho a serem avaliados nas linhas estudadas;
- b) As variáveis significativas contidas no modelo a ser construído foram escolhidas após a utilização do *software* Witness, que permitiu visualizar e compreender a dinâmica operacional da linha;
- c) Foi desenvolvido um planejamento de experimento para os testes utilizando-se da técnica de DOE - *Design Of Experiment*;
- d) Foi elaborado, em Excel, um modelo computacional utilizando-se de Simulação de Monte Carlo e capaz de mensurar os objetivos de desempenho em função das variáveis significativas selecionadas;
- e) O modelo foi testado em uma linha real de produção de guardanapos embalados e personalizados de papel.

Os experimentos realizados e a avaliação dos resultados obtidos, utilizando-se de uma análise de variância - ANOVA para testar a hipótese, fundamentaram a confirmação da tese, sendo possível identificar alguns comportamentos durante as simulações:

- a) A configuração de capacidade da linha produtiva interfere diretamente no resultado (em termos de TR e WIP) das linhas de produção discretas em série de até cinco estações de trabalho;
- b) A introdução de *mix* diversificados de produtos altera a configuração de balanceamento da linha;

- c) Mesmo em situações nas quais o impacto do *mix* é positivo, é possível que o resultado final da operação da linha resulte em TR mais baixo e maior estoque;
- d) A produtividade da linha é diretamente influenciada pelo tempo de ciclo do gargalo após a introdução de cada item do *mix*;
- e) Quando a introdução do item no *mix* não resulta em mudança da posição relativa do gargalo na linha, isto é, o gargalo é mantido no mesmo lugar, o impacto no estoque médio é menor;
- f) Funcionando com o uma linha dedicada a um único tipo de produto, o modelo testado apontou para melhores desempenho em termos de TR e WIP para as configurações de capacidade desbalanceadas, especialmente as configurações linear e em passo;
- g) Em maior parte das situações, a configuração de capacidade em passo mantém um resultado igual ou melhor em termos de TR e WIP, quando comparadas às demais configurações testadas;
- h) Com a introdução do *mix*, a configuração em passo tende a se diferenciar mais da linear;
- i) Em algumas situações configurações desbalanceadas em *bowl shape* ou segmentadas podem apresentar melhores resultados de TR do que a configuração linear ou em passo, mas geralmente a configuração de pior desempenho com a introdução do *mix* nas condições apresentadas é a configuração balanceada.

## 6.2 Limitações da pesquisa

Mesmo sendo a técnica de simulação bastante empregada para os estudos sobre o tema, é preciso destacar alguns cuidados a serem tomados durante a interpretação dos seus resultados. Primeiramente, todo e qualquer modelo computacional sempre deve ser tomado como uma representação da realidade e, neste sentido, é uma aproximação do sistema que busca representar. Sempre existirão erros, por mais cuidadosa que tenha sido a preparação do modelo.

Desta forma, o modelo utilizado para o estudo do comportamento de sistemas produtivos deve estar limitado às seguintes características para sistemas analisados:

- a) Sistema de produção em série com cinco estações de trabalho;
- b) Sistema de produção discreta;
- c) Distribuição normal dos tempos de ciclo nas estações;

- d) Tempo de ciclo independente entre as estações de trabalho;
- e) Não há multi-tarefa;
- f) Tamanho de *buffer* limitado para a configuração *bowl* invertido;
- g) Tamanho de *buffer* ilimitado para demais configurações;
- h) Tempo de *set up* desconsiderado;
- i) Tempo de ciclo pode ser alterado até em 100% do tempo original com a introdução do *mix*;
- j) Sequenciamento do *mix* desconsiderado.

Outra preocupação a ser considerada durante o trabalho com simulações é o reconhecimento de que o *software* utilizado contém naturalmente limitações, decorrentes de sua estrutura de funcionamento. Assim, por exemplo, tanto o Witness quanto o Excel contém algoritmos para a geração das distribuições de frequência ou dos números aleatórios, para os arredondamentos dos cálculos e para outras funcionalidades que diferem a depender do sistema utilizado. Ao utilizar os dados gerados por meio destes sistemas certamente haverá uma distância (ou erro) quando comparado ao comportamento de um sistema real. Um exemplo simples está na não inclusão no modelo de aspectos comportamentais inerentes dos seres humanos que estão presentes na operação dos centros produtivos.

Mesmo tendo sido o planejamento de experimento cuidadosamente desenvolvido para evitar possíveis vieses no decorrer do experimento e de suas conclusões, vale destacar que o modelo apresentado é incapaz de representar todas as variáveis de um sistema real. Só para citar alguns exemplos, neste modelo não foram incluídos fatores como o nível de desgaste e o tempo de uso dos equipamentos presentes nas estações de trabalho; aspectos comportamentais dos operadores, como nível de motivação, grau de escolaridade, tempo de função, entre outros; aspectos legais ou regulatórios do ambiente onde o sistema se insere, como necessidade de intervalos de repouso, limitações ergonômicas; e vários outros aspectos.

### **6.3 Possibilidade de trabalhos futuros**

O tema de distribuição de capacidade de linhas de produção, mesmo tendo sido estudado há mais de 50 anos, ainda apresenta muitas lacunas a serem preenchidas. Um fato que corrobora esta afirmação é a distância que ainda existe entre a pesquisa acadêmica na área e a prática empresarial.

A estruturação deste modelo computacional em Excel desenvolvido para a instrumentação da tese abre espaço para uma série de trabalho futuros, visando ampliar o conhecimento sobre o tema e aproximar a prática empresarial das soluções acadêmicas oferecidas. Eis alguns dos trabalhos que podem estar sendo desenvolvidos como continuação desta pesquisa:

- a) Ampliar o modelo para número maior de estações de trabalho e avaliar a interferência do número de estações nos objetivos de desempenho;
- b) Testar o modelo sob diferentes distribuições de tempo de ciclo, avaliando a interferência de cada distribuição;
- c) Ampliar o modelo para outros formatos de linha de produção, como estações em paralelo, convergência e divergência de linhas, entre outros arranjos possíveis;
- d) Incluir no modelo fatores relacionados às perdas de produtividade por paradas de manutenção, confiabilidade de equipamentos, tempo médio entre falhas (MTBF) e tempo médio para reparo (MTTR);
- e) Geração da patente para o *software*, de forma a oferecer uma ferramenta computacional para o projeto de sistemas de capacidade e para a avaliação de viabilidade de sistemas existentes.

Esta tese é encerrada destacando a importância dos estudos de distribuição de capacidade para os centros produtivos e na expectativa que futuros trabalhos sobre o tema ajudem as organizações a atingirem seus objetivos de forma mais eficiente e eficaz.

---

**Documentos**


---

**A.1 APÊNDICE I - Evolução do WIP e TR com o BE em um linha com Bowl Shape**

Tabela A.1: Evolução do TR e WIP com a alteração do BE

BE	WIP	TR	CT Gargalo	CT N-Gargalo
1	2,65	173	10	10
0,992	2,55	174	10	9,8
0,984	2,49	175	10	9,6
0,976	2,42	175	10	9,4
0,968	2,36	176	10	9,2
0,960	2,30	176	10	9,0
0,952	2,23	176	10	8,8
0,944	2,17	176	10	8,6
0,936	2,12	176	10	8,4
0,928	2,08	176	10	8,2
0,920	2,03	177	10	8,0
0,912	1,99	177	10	7,8
0,904	1,95	177	10	7,6
0,896	1,91	177	10	7,4
0,888	1,87	177	10	7,2
0,880	1,83	177	10	7,0
0,872	1,79	177	10	6,8
0,864	1,76	177	10	6,6
0,856	1,72	177	10	6,4
0,848	1,68	178	10	6,2
0,840	1,65	178	10	6,0
0,832	1,62	178	10	5,8
0,824	1,59	178	10	5,6
0,816	1,55	178	10	5,4
0,808	1,52	178	10	5,2
0,800	1,51	178	10	5,0
0,792	1,50	179	10	4,8
0,784	1,49	179	10	4,6
0,776	1,48	179	10	4,4
0,768	1,47	179	10	4,2

0,760	1,46	179	10	4,0
0,752	1,45	179	10	3,8
0,744	1,43	179	10	3,6
0,736	1,42	179	10	3,4
0,728	1,41	180	10	3,2
0,720	1,40	180	10	3,0
0,712	1,39	180	10	2,8
0,704	1,38	180	10	2,6
0,696	1,37	181	10	2,4
0,688	1,36	181	10	2,2
0,680	1,35	181	10	2,0
0,672	1,34	182	10	1,8
0,664	1,33	182	10	1,6
0,656	1,31	182	10	1,4
0,648	1,30	183	10	1,2
0,640	1,29	183	10	1,0
0,632	1,28	183	10	0,8
0,624	1,27	183	10	0,6
0,616	1,26	183	10	0,4
0,608	1,25	184	10	0,2

---

## ***A.2 APÊNDICE II - Comparação de resultados: Witness e Simulador em Excel***

Características da linha: Configuração: Balanceada; Tempo de Ciclo do gargalo: 10 minutos; Distribuição de tempo: Normal, com média = 10 e desvio padrão = 1

Tabela A.2: Comparação dos resultados de TR e WIP com Witness e modelo em Excel

Tempo (min)	TR - Witness	TR Excel	WIP Witness	WIP Excel
5.000	486	485	7	9
5.500	536	535	7	9
6.000	586	585	6	10
6.500	636	635	8	8
7.000	687	686	6	8
7.500	736	737	7	8
8.000	787	786	7	9
8.500	837	836	6	11
9.000	886	885	9	12
9.500	936	935	8	12
10.000	985	987	10	12
10.500	1034	1038	13	12
11.000	1084	1089	13	11
11.500	1133	1139	14	12
12.000	1183	1188	15	14
12.500	1232	1237	16	16
13.000	1283	1288	14	15
13.500	1332	1238	14	17
14.000	1382	1388	15	17
14.500	1432	1437	14	18
15.000	1481	1488	15	17
15.500	1531	1538	15	16
16.000	1581	1587	15	16
16.500	1631	1637	14	17
17.000	1681	1689	15	16
17.500	1732	1738	14	16
18.000	1780	1789	16	17
18.500	1830	1839	17	18
19.000	1880	1890	18	18
19.500	1929	1940	19	18
Média	1208,3	1212,3	12,2	13,6

### A.3 APÊNDICE III - Dados de TR utilizados para teste de ANOVA

Tabela A.3: Dados de TR utilizados para ANOVA

TR - Balanceado	TR - <i>owl</i>	TR - Linear	TR - Passo	TR - Segmentado
19954.131	20000.251	20009.378	20009.378	19999.606
19952.191	19978.265	20023.388	20023.388	19986.152
19918.369	20017.170	20025.102	20025.102	19978.279
19940.297	19975.225	20022.101	20022.101	19967.321
19939.246	19984.179	20022.382	20022.382	20002.867
19949.135	19980.124	20012.649	20012.649	20011.159
19949.135	19980.124	20012.649	20012.649	20011.159
19954.264	19973.424	19976.314	19976.314	19976.314
19957.396	20001.699	20007.317	20007.317	19994.205
19929.637	19973.037	19976.330	19976.330	19968.146
19935.164	19967.543	19970.161	19970.160	19959.149
19959.697	20007.485	20027.920	20027.920	20010.893
19921.511	19958.207	19980.857	19980.857	19963.302
19936.349	19945.004	19947.637	19947.637	19941.761
19972.909	19988.066	20010.479	20010.479	19987.525
19962.490	20010.270	20024.516	20024.516	20002.064
19917.228	19968.180	20012.105	20012.105	19999.029
19934.844	19989.369	20010.423	20010.423	19979.157
19928.428	19946.672	19988.756	19988.756	19984.956
19940.424	19949.085	19991.757	19991.757	19976.338
19954.567	19991.549	20029.216	20029.216	20001.343
19943.535	19966.872	19979.565	19979.565	19970.494
19951.304	19996.023	20026.385	20026.385	19962.285
19940.903	20006.455	20019.318	20019.318	19986.877
19935.553	19972.907	19999.564	19999.564	19979.249
19927.729	19980.301	20019.322	20019.322	20017.326
19919.145	19994.121	20029.372	20029.372	19965.432
19938.790	19971.129	19996.536	19996.536	19984.798
19965.394	19988.569	19989.020	19989.020	19989.020
19967.982	20026.503	20058.969	20058.969	20016.218
19943.258	19982.927	20006.650	20006.650	19985.747

#### A.4 APÊNDICE IV - *Dados utilizados no estudo de caso*

Tabela A.4: Dados levantados do caso para cada estação de trabalho

Impressora	Acopladora	Refiladora	Corte e dobra	Embalagem
7.919	7.560	4.755	6.562	6.875
6.000	7.808	9.677	10.319	12.042
6.133	6.202	6.859	8.219	6.703
5.524	6.055	6.349	6.699	9.075
7.020	6.677	8.800	7.681	7.987
7.397	8.042	6.818	8.057	7.852
9.489	8.876	4.402	17.021	7.413
9.148	9.505	9.468	6.944	6.801
5.938	13.362	7.365	7.244	7.299
7.251	6.557	7.843	4.736	8.663
6.250	7.143	5.333	6.310	3.267
8.116	7.692	6.824	8.333	10.117
8.639	6.204	7.132	6.588	6.489
6.887	7.299	8.772	7.759	7.503
6.729	7.800	5.555	7.989	7.353
19943.258	19982.927	20006.650	20006.650	19985.747

### A.5 APÊNDICE V - Histogramas dos dados das estações de trabalho - estudo de caso

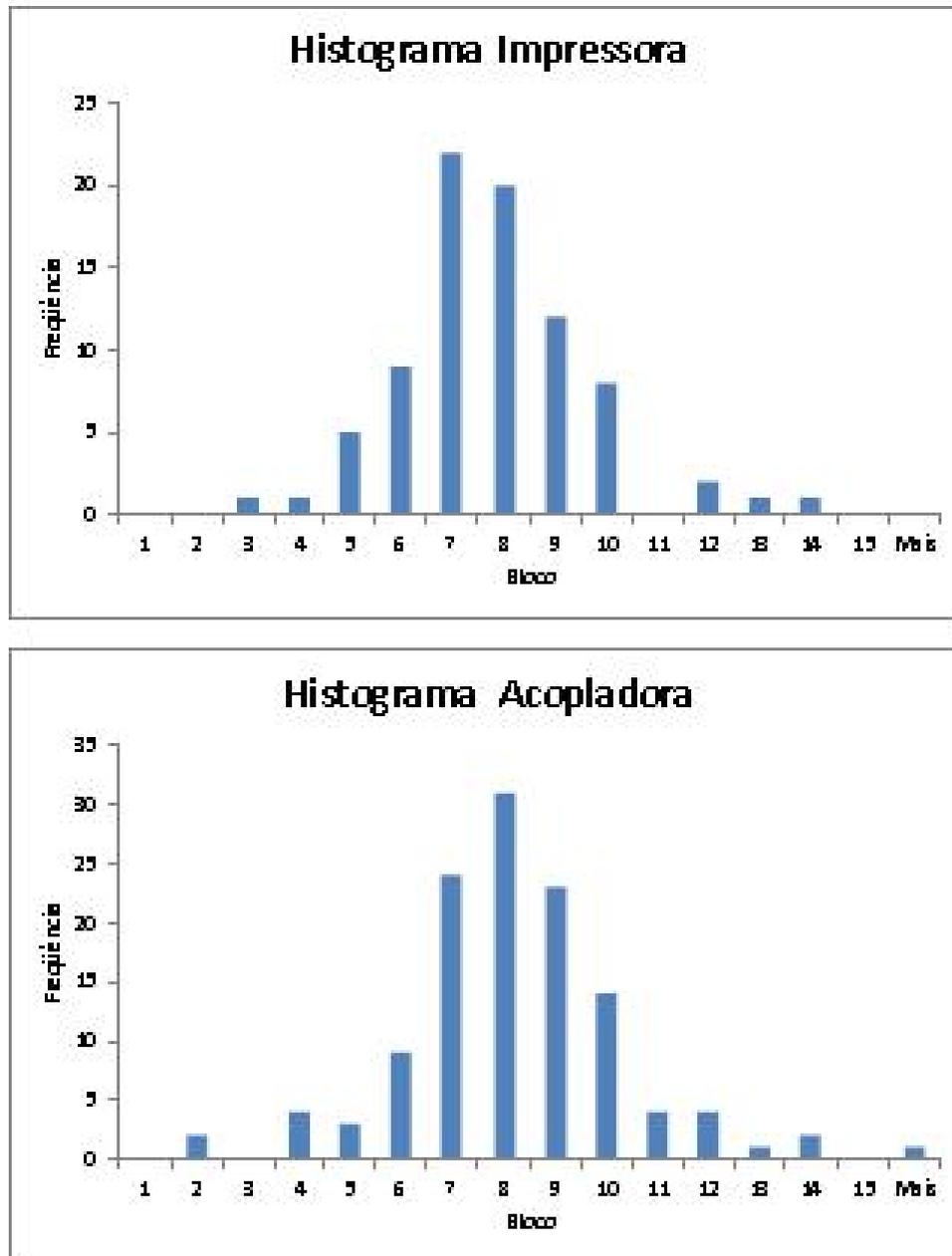


Figura A.1: Histogramas: Impressora e Acopladora

## **A.6 APÊNDICE VI - Exemplos de sistemas produtivos com até cinco estações de trabalho**

Tabela A.5: Listagem de sistemas produtivos discretos com até cinco estações de trabalho

Produto	Empresa	Qtde	Processos
Guardanapo embalado	Leal	5	Impressão - acoplagem - refil corte e dobra - embalagem
Canudos variados	Plastifama	4	Laminação - dobra corte pá - embalagem
Termoformados	Copobrás	3	Laminação e corte blister - embalagem
Sacos plásticos	Iplasa	4	Preparação - laminação impressão - embalagem
Cordas de sisal	Sisalana	4	Preparação - fiação bobinadeira - cordoaria
Insertos metal duro	Durit	5	Mistura - sinterização prensa - usinagem - embalagem
Etiquetas	Etiquetol	3	Impressão - refil e corte Embalagem
Trefilados	Telcon	3	Trefila - corte e dobra solda
Pregos	Açonorte	3	Trefila - corte embalagem

---

## Referências

---

- ANDERSON, D. R.; MOODIE, C. L. Optimal buffer storage capacity in production. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 7, n. 3, p. 233–240, 1968. ISSN 0020-7543.
- ATWATER, J. B.; CHAKRAVORTY, S. S. Does protective capacity assist managers in competing along time-based dimensions? 1994.
- AXSATER, S. *Inventory Control*. Lund: LLC, 2006.
- BAKER, K. R.; POWELL, S. G.; PYKE, D. F. Buffered and unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of manufacturing and operations management*, v. 3, n. 3, p. 200–223, 1990.
- BAYBARS, I. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management science*, Informs, v. 32, n. 8, p. 909–932, 1986. ISSN 0025-1909.
- BECKER, C.; SCHOLL, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 168, n. 3, p. 694–715, 2006.
- BINDER, K. Monte-carlo methods. *Mathematical Tools for Physicists. Ed. G. Trigg. 1th Edition (Wiley-VCH, Germany, 2005)*, p. 249–280, 2006.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 111, n. 2, p. 509–528, 2008. ISSN 0925-5273.
- BUZACOTT, J. A. Prediction of the efficiency of transfer lines without internal storage. *International Journal of Production Research*, v. 6, n. 3, 1968.
- CARNALL, C. A.; WILD, R. The location of variable work stations and te performance of production flow lines. *The International Journal Of Production Research*, Taylor & Francis, v. 14, n. 6, p. 703–710, 1976.
- CASTELLUCCI, P. B.; COSTA, A. M. A new look at the bowl phenomenon. *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, v. 35, n. 1, p. 57–72, 2015. ISSN 0101-7438.
- CAVAZZUTI, M. Design of experiments. In: *Optimization Methods*. [S.l.]: Springer, 2013. p. 13–42.
- CHAHARSOOGHI, S.; JAFARI, N. A simulated annealing approach for product mix decisions. *Scientia Iranica*, v. 14, n. 3, p. 230–235, 2007.

- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. A comparative study of line design approaches for serial production systems. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 16, n. 6, p. 91–108, 1996. ISSN 0144-3577.
- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems. *International Journal of Production Economics*, v. 95, n. 3, p. 347–357, mar 2005. ISSN 09255273.
- CHIANG, W.-C.; URBAN, T. L.; XU, X. A bi-objective metaheuristic approach to unpaced synchronous production line-balancing problems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 50, n. 1, p. 293–306, 2012. ISSN 0020-7543.
- CHOW, W.-M. Buffer capacity analysis for sequential production lines with variable process times. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 25, n. 8, p. 1183–1196, 1987. ISSN 0020-7543.
- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, Taylor & Francis, v. 35, n. 1, p. 1–12, 1993.
- CONWAY, R.; MAXWELL, W.; MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J. The role of work-in-process inventory in serial production lines. *Operations Research*, Informs, v. 36, n. 2, p. 229–241, 1988. ISSN 0030-364X.
- CORBETTNETO, T. *Contabilidade de Ganhos: a nova abordagem gerencial de acordo com a teoria das restrições*. [S.l.: s.n.], 1997.
- CORREA, H.; CORREA, A. *Administração de Produção e Operações*. [S.l.: s.n.], 2004.
- CRAIGHEAD, C. W.; PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D. Protective capacity positioning : Impact on manufacturing cell performance. *European Journal of Operational Research*, v. 134, p. 425–438, 2001.
- DALLERY, Y.; GERSHWIN, S. B. Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. *Queueing systems*, Springer, v. 12, n. 1-2, p. 3–94, 1992. ISSN 0257-0130.
- DAVIS, L. E. Pacing effects on manned assembly lines. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 4, n. 3, p. 171–184, 1965. ISSN 0020-7543.
- DOLGUI, A.; EREMEEV, A.; KOLOKOLOV, A.; SIGAEV, V. A genetic algorithm for the allocation of buffer storage capacities in a production line with unreliable machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Springer, v. 1, n. 2, p. 89–104, 2002. ISSN 1570-1166.
- DOLGUI, A.; GUSCHINSKY, N.; LEVIN, G. A mixed integer program for balancing of transfer line with grouped operations. In: *Proceedings of the 28th International Conference on Computer and Industrial Engineering*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 5–7.

- DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C. Simulação de monte carlo na avaliação de incertezas de medição. 2005.
- DRISCOLL, J.; THILAKAWARDANA, D. The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 81–86, 2001. ISSN 0736-5845.
- EL-RAYAH, T. E. The effect of inequality of interstage buffer capacities and operation time variability on the efficiency of production line systems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 17, n. 1, p. 77–89, 1979. ISSN 0020-7543.
- EREL, E.; SARIN, S. C. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control*, Taylor & Francis, v. 9, n. 5, p. 414–434, 1998. ISSN 0953-7287.
- FILHO, M. G.; UZSOY, R. Assessing the impact of alternative continuous improvement programmes in a flow shop using system dynamics. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 52, n. 10, p. 3014–3031, 2014. ISSN 0020-7543.
- FISHER, R. A. Design of experiments. *British Medical Journal*, BMJ Group, v. 1, n. 3923, p. 554, 1936.
- FREEMAN, M. C. The effects of breakdowns and interstage storage on production line capacity. *Journal of Industrial Engineering*, v. 15, n. 4, p. 194–200, 1964.
- FRY, T.; RUSSELL, G. Capacity allocation strategies in a hypothetical job-shop. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, Taylor & Francis, v. 31, n. 5, p. 1097–1115, 1993.
- GENIKOMSAKIS, K. N.; TOURASSIS, V. D. A simulation-based assessment of alternative assembly line configurations. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1626–1631. ISBN 142442383X.
- GERSHWIN, S. B.; SCHICK, I. C. Modeling and analysis of three-stage transfer lines with unreliable machines and finite buffers. *Operations Research*, INFORMS, v. 31, n. 2, p. 354–380, 1983.
- GERSHWIN, S. B.; SCHOR, J. E. Efficient algorithms for buffer space allocation. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 93, n. 1-4, p. 117–144, 2000. ISSN 0254-5330.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 1991.
- GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas, 1999.
- GOLDRATT, E. M. The unbalanced plant. In: *APICS 24th Annual International Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1981.
- GOLDRATT, E. M. *The haystack syndrome: Shifting information out of the data ocean*. Great Barrington: North River Press, 1990. 261 p.

- GOLDRATT, E. M. My saga to improve production. *Management Today-London*, Management Publications Ltd, 1996. ISSN 0025-1925.
- GOLDRATT, E. M. *It's not luck. Croton-Hudson*. [S.l.]: New York: North River Press, 2004.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. *The Goal*. Great Barrington: North River Press, 1984. 385 p.
- GOLDRATT, E. M.; FOX, R. *The race*. Great Barrington: North River Press, 1986.
- GREENHALGH, T. et al. Storylines of research in diffusion of innovation: a meta-narrative approach to systematic review. *Social science & medicine*, Elsevier, v. 61, n. 2, p. 417–430, 2005.
- GUPTA, M.; SNYDER, D. Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 47, n. 13, p. 3705–3739, 2009. ISSN 0020-7543.
- GUPTA, Y. P.; GOYAL, S. Flexibility of manufacturing systems: concepts and measurements. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 43, n. 2, p. 119–135, 1989.
- HARLE, N.; PICH, M.; HEYDEN, L. V. D. Mark & Spencer and Zara: Process Competition in the textile appareal industry. *INSEAD Publishing*, 2001.
- HARREL, C. R.; MATT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. *Simulação: otimizando os sistemas*. São Paulo: IMAN, 2002. 136 p.
- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. Effect of some design factors on efficiency of production lines with variable operation times. *Journal of Industrial Engineering*, v. 17, n. 12, p. 651, 1966.
- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. Toward characterizing the optimal allocation of work in production line systems with variable operation times. *Advances in Operations Research*, North-Holland, Amsterdam, p. 109–119, 1977.
- HILLIER, F. S.; BOLING, R. W. On the optimal allocation of work in symmetrically unbalanced production line systems with variable operation times. *Management Science*, INFORMS, v. 25, n. 8, p. 721–728, 1979.
- HILLIER, F. S.; SO, K. C. The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 29, n. 10, p. 2043–2055, 1991. ISSN 0020-7543.
- HILLIER, F. S.; SO, K. C. Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 31, n. 4, p. 811–822, 1993. ISSN 0020-7543.

- HILLIER, F. S.; SO, K. C. On the optimal design of tandem queueing systems with finite buffers. *Queueing Systems*, Springer, v. 21, n. 3-4, p. 245–266, 1995. ISSN 0257-0130.
- HILLIER, F. S.; SO, K. C. On the robustness of the bowl phenomenon. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 89, n. 3, p. 496–515, 1996. ISSN 0377-2217.
- HILLIER, M. S. Designing unpaced production lines to optimize throughput and work-in-process inventory. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 45, n. 5, p. 516–527, 2013. ISSN 0740-817X.
- HILMOLA, O.-P. Using Goldratt's dice-game to introduce system dynamics models and simulation analysis. *International Journal of Information and Operations Management Education*, Inderscience Publishers, v. 1, n. 4, p. 363–376, 2006. ISSN 1744-2303.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. *Factory physics*. Long Grove: Waveland Press, 2011. ISBN 1478609044.
- HUDSON, S.; MCNAMARA, T.; SHAABAN, S. Unbalanced lines: where are we now? *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 53, n. 6, p. 1895–1911, 2015. ISSN 0020-7543.
- HUTCHINSON, S.; VILLALOBOS, J.; BERUVIDES, M. Effects of high labour turnover in a serial assembly environment. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 35, n. 11, p. 3201–3224, 1997.
- JEFFERS, J. N. R. *Design of experiments*. [S.l.]: NERC, 1978.
- JR, J. H. B.; III, J. F. C. Designing unbalanced lines-understanding protective capacity and protective inventory. *Production Planning & Control*, Taylor & Francis, v. 13, n. 4, p. 416–423, 2002.
- KADIPASAOGLU, S. N.; XIANG, W.; HURLEY, S. F.; KHUMAWALA, B. M. A study on the effect of the extent and location of protective capacity in flow systems. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 63, n. 3, p. 217–228, 2000.
- KERLINGER, F. N. *Metodologia da pesquisa em ciências sociais: um tratamento conceitual*. São Paulo: EPU, 1980.
- KIM, S.; COX, J. F.; MABIN, V. J. An exploratory study of protective inventory in a re-entrant line with protective capacity. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 48, n. 14, p. 4153–4178, 2010. ISSN 0020-7543.
- KRAJEWSKI, L. J.; KING, B. E.; RITZMAN, L. P.; WONG, D. S. Kanban, MRP and shaping the manufacturing environment. *Management Science*, v. 33, n. 1, p. 39–57, 1987.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. d. A. *Metodologia do Trabalho Científico*. São Paulo: Atlas, 1991.

- LANGE, I.; ZIEGENBEIN, A. The constraints game - learning the Theory of Constraints with a dice game. In: SMEDS, R.; RIIS, J.; HAHO, P.; JAATINEN, M. (Ed.). *Proceedins of the 9th Workshop of the IFPI WG 5.7 Special Interest Group on Experimental Interactive Learning in Industrial Management*. Finland: Citeseer, 2005. p. 95.
- LAPIDE, L.; COTTRILL, K. Proceedings of the supply chain 2020 project's industry advisory council kickoff meeting, center for Transportation & Logistics. 2004.
- LAU, H.-S. On balancing variances of station processing times in unpaced lines. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 61, n. 3, p. 345–356, 1992.
- LAWRENCE, S. R.; BUSS, A. H. Shifting production bottlenecks: causes, cures, and conundrums. *Production and operations management*, Wiley Online Library, v. 3, n. 1, p. 21–37, 1994.
- LEE, H.; BILLINGTON, C.; CARTER, B. Hewlett Packard gains control of inventory and service through design for localization. *Interfaces*, v. 23, p. 1–11, 1993.
- LEPORE, D.; COHEN, O. *Deming and goldratt: The theory of constraints and the system of profound knowledge: The decalogue*. [S.l.]: North River Pr, 1999.
- LI, J.; BLUMENFELD, D. E.; MARIN, S. P. Production system design for quality robustness. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 40, n. 3, p. 162–176, 2008. ISSN 0740-817X.
- LITTLE, J. D. C. Tautologies, models and theories: Can we find laws of manufacturing? *IIE transactions*, Taylor & Francis, v. 24, n. 3, p. 7–13, 1992. ISSN 0740-817X.
- LIU, C.-M.; LIN, C.-L. Performance evaluation of unbalanced serial production lines. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 32, n. 12, p. 2897–2914, 1994. ISSN 0020-7543.
- LUCERTINI, M.; PACCIARELLI, D.; PACIFICI, A. Modeling an assembly line for configuration and flow management. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 11, n. 1, p. 15–24, 1998. ISSN 0951-5240.
- MANDELBAUM, M.; BUZACOTT, J. Flexibility and decision making. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 17–27, 1990.
- MANIKAS, A.; GUPTA, M.; BOYD, L. Experiential exercises with four production planning and control systems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, n. ahead-of-print, p. 1–12, 2014. ISSN 0020-7543.
- MCNAMARA, T.; SHAABAN, S.; HUDSON, S. Simulation of unbalanced buffer allocation in unreliable unpaced production lines. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 51, n. 6, p. 1922–1936, 2013. ISSN 0020-7543.

- MEREDITH, J. Building operations management theory through case and field research. *Journal of operations management*, Elsevier, v. 16, n. 4, p. 441–454, 1998. ISSN 0272-6963.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- MOORE, D. S.; MCCABE, G. P.; DUCKWORTH, W. M.; SCLOVE, S. L. *A prática da estatística empresarial: como usar dados para tomar decisões*. Rio de Janeiro: LTC Rio de Janeiro, 2006. ISBN 85-216-1500-0.
- MURRELL, K. F. H. Operator variability and its industrial consequences. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 1, n. 3, p. 39–55, 1961. ISSN 0020-7543.
- MUTH, E. J.; ALKAFF, A. The bowl phenomenon revisited. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 25, n. 2, p. 161–173, 1987.
- NAGURNEY, A. Optimal supply chain network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 128, n. 1, p. 200–208, nov 2010. ISSN 09255273. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925527310002616>.
- NAHAS, N.; AIT-KADI, D.; NOURELFATH, M. A new approach for buffer allocation in unreliable production lines. *International journal of production economics*, Elsevier, v. 103, n. 2, p. 873–881, 2006. ISSN 0925-5273.
- NOREEN, E.; SMITH, D.; MACKEY, J. T. *Theory of Constraints and Its Implications for Management Accounting: A Report on the Actual Implementation of The Theory of Constraints*. [S.l.]: North River Press, Incorporated, 1995. ISBN 0884271161.
- PATTERSON, J. W.; FREDENDALL, L. D.; CRAIGHEAD, C. W. The impact of non-bottleneck variation in a manufacturing cell. *Production Planning & Control*, Taylor & Francis, v. 13, n. 1, p. 76–85, 2002. ISSN 0953-7287.
- PATTI, A. L.; WATSON, K. J. Downtime variability: the impact of duration–frequency on the performance of serial production systems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 48, n. 19, p. 5831–5841, 2010.
- PAYNE, S.; SLACK, N.; WILD, R. A note on the operating characteristics of unbalanced and unbalanced production flow lines. *The International Journal Of Production Research*, Taylor & Francis, v. 10, n. 1, p. 93–98, 1972.
- PIKE, R.; MARTIN, G. E. The bowl phenomenon in unpaced lines. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, Taylor & Francis, v. 32, n. 3, p. 483–499, 1994. ISSN 0020-7543.

- PINE, B. J.; VICTOR, B.; BOYNTON, A. C. Making mass customization work. *Harvard business review*, v. 71, n. 5, p. 108–111, 1993.
- POWELL, S. G. Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 32, n. 9, p. 2201–2217, 1994. ISSN 0020-7543.
- POWELL, S. G.; PYKE, D. F. Buffering unbalanced assembly systems. *IIE transactions*, Springer, v. 30, n. 1, p. 55–65, 1997. ISSN 0740-817X.
- RADOVILSKY, Z. D. A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints. *International Journal of Production Economics*, v. 55, n. 2, p. 113–119, 1998.
- RAO, N. P. On the mean production rate of a two-stage production system of the tandem type. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 13, n. 2, p. 207–217, 1975.
- REKIEK, B.; DELCHAMBRE, A.; DOLGUI, A.; BRATCU, A. Assembly line design: a survey. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 35, n. 1, p. 155–166, 2002. ISSN 1474-6670.
- REKIEK, B.; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A.; BRATCU, A. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 163–174, 2002. ISSN 1367-5788.
- SALVESON, M. E. The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, v. 6, n. 3, p. 18–25, 1955.
- SCHOLL, A.; BECKER, C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 168, n. 3, p. 666–693, 2006. ISSN 0377-2217.
- SHAABAN, S. Unpaced production lines with jointly unbalanced operation time means and buffer capacities—their behaviour and performance. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Inderscience Publishers Ltd, v. 23, n. 1-2, p. 54–68, 2011. ISSN 1368-2148.
- SHAABAN, S.; HUDSON, S. The performance of unpaced serial production lines with unequal coefficients of variation of processing times. *International Journal of Computer Applications in Technology*, Inderscience Publishers, v. 34, n. 2, p. 122–128, 2009.
- SHAABAN, S.; MCNAMARA, T. The effects of joint operations time means and variability unbalance on production line performance. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Inderscience Publishers, v. 18, n. 1, p. 59–78, 2009.

- SHAABAN, S.; MCNAMARA, T. Improving the efficiency of unpaced production lines by unbalancing service time means. *International Journal of Operational Research*, Inderscience Publishers, v. 4, n. 3, p. 346–361, 2009.
- SHAABAN, S.; MCNAMARA, T. The effects of joint operations time means and variability unbalance on production line performance. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Inderscience Publishers, v. 18, n. 1, p. 59–78, 2009. ISSN 1368-2148.
- SHAABAN, S.; MCNAMARA, T.; HUDSON, S. Mean time imbalance effects on unreliable unpaced serial flow lines. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, 2014. ISSN 0278-6125.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. Tese (Doutorado) — UFSC, 2005.
- SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. *Cadeia de suprimentos projeto e gestão: conceitos, estratégias e estudos de caso*. [S.l.]: Bookman Editora, 2009.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. [S.l.: s.n.], 2002.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.; BETTS, A. *Gerenciamento de Operações e de Processos*. [S.l.: s.n.], 2008.
- SLOAN, W. A. *A Study on the Effect of Protective Capacity on Cycle Time in Serial Production Lines*. [S.l.]: Mississippi State University, 2001.
- SMUNT, T. L.; PERKINS, W. C. Stochastic unpaced line design: review and further experimental results. *Journal of Operations Management*, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 351–373, 1985. ISSN 0272-6963.
- SMUNT, T. L.; PERKINS, W. C. Stochastic unpaced line design: A reply. *Journal of Operations Management*, Elsevier, v. 8, n. 1, p. 55–62, 1989.
- SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. Análise e proposições sobre o balanceamento e uso de excesso de capacidade em recursos produtivos. *Gestão & Produção*, v. 6, n. 2, 1999.
- STERMAN, J. D. All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, Wiley Online Library, v. 18, n. 4, p. 501–531, 2002. ISSN 1099-1727.
- SUHAIL, A. Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 21, n. 5, p. 627–640, 1983. ISSN 0020-7543.
- SWAMINATHAN, J. M.; TAYUR, S. Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes. *Management Science*, v. 44, p. 161–172, 1999.

- TEMPELMEIER, H. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 41, n. 1, p. 149–170, 2003. ISSN 0020-7543.
- TENHIÄLÄ, A. Contingency theory of capacity planning: The link between process types and planning methods. *Journal of Operations Management*, v. 29, n. 1-2, p. 65–77, jan 2011. ISSN 02726963. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272696310000446>>.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, Wiley Online Library, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.
- TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC Rio de Janeiro, 2005. 656 p. ISBN 85-216-1431-4.
- VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. *International journal of operations & production management*, MCB UP Ltd, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.
- WYCHE, P. D. L.; WILD, R. The design of imbalanced series queue flow lines. *Journal of the Operational Research Society*, Springer, v. 28, n. 3, p. 695–702, 1977.
- YAHYA-ZADEH, M. Product-mix decisions under activity-based costing with resource constraints and non-proportional activity costs. *Journal of Applied Business Research*, v. 14, n. 4, p. 39–46, 2011.
- YAMAZAKI, G.; SAKASEGAWA, H.; SHANTHIKUMAR, J. G. On optimal arrangement of stations in a tandem queueing system with blocking. *Management Science*, INFORMS, v. 38, n. 1, p. 137–153, 1992. ISSN 0025-1909.

*A DISTRIBUIÇÃO DE CAPACIDADES E O DESEMPENHO DE LINHAS  
PRODUTIVAS:*

*Uma análise sobre a utilização de mix de produtos*

Rogério Flores da Silva

Salvador, Dezembro de 2016.