

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MELHORIA DE SISTEMAS
DE PRODUÇÃO BASEADA NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS
DISCRETOS E MANUFATURA ENXUTA**

AUTOR: RODRIGO FERRO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUIS HELLENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2014

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MELHORIA DE SISTEMAS
DE PRODUÇÃO BASEADA NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS
DISCRETOS E MANUFATURA ENXUTA**

RODRIGO FERRO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 11 de março de 2014, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. André Luis Helleno
(Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP)

Prof^a. Dr^a. Maria Célia de Oliveira
(Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP)

Prof^a. Dr^a. Roxana Maria Martinez Orrego
(Universidade Presbiteriana Mackenzie)

AGRADECIMENTOS

Ao final deste trabalho devo agradecer primeiramente a DEUS que me abençoou nos momentos de dificuldade, á minha família Fabiana e Pedro que foram em todos os momentos fonte de motivação e alegria para vencer este desafio, á meus pais e amigos que me aconselharam a nunca desistir, mesmo que o obstáculo parecesse intransponível.

De maneira especial agradeço ao meu orientador, e agora amigo, André Luis Helleno, por compartilhar seu conhecimento com mais um aluno. A professora Maria Célia de Oliveira que me ajudou a organizar e planejar várias das atividades contidas neste trabalho e aos membros da banca.

O objeto de estudo deste trabalho foi definido por conta de meu conhecimento prévio em simulação e isso eu devo em especial a Misael Marques Dias e Erico Bollmann Junior que me deram a oportunidade de conhecer e me especializar neste assunto.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que participaram direto ou indiretamente para a conquista desta meta e isso inclui a empresa Schaeffler por ceder informações e casos de estudo e a CAPES por financiar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE TABELAS.....	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	3
1.2. OBJETIVO	5
1.2.1. OBJETIVO GERAL	5
1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	5
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1. SISTEMAS DE PRODUÇÃO	7
2.2. MANUFATURA ENXUTA	19
2.3. TEORIA DAS FILAS	25
2.4. SIMULAÇÃO.....	30
2.5. MODELAGEM DOS DADOS.....	40
3. MÉTODO DE PESQUISA.....	45
4. O MÉTODO PROPOSTO	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1. CASO 1 – REDUÇÃO DE WIP	53
5.2. CASO 2 – AQUISIÇÃO DE NOVOS EQUIPAMENTOS.....	62
5.3. CASO 3 – JUSTIFICATIVA DE INVESTIMENTO PARA NOVAS TECNOLOGIAS DE CORTE	68
5.4. CASO 4 – CRIAÇÃO DE NOVOS CENÁRIOS PARA A MELHORIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO	78
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- FIFO – First In First Out.
- IC – Intervalo Médio de Chegada.
- JIT – Just In Time.
- LIFO – Last In First Out.
- M – Quantidade de Atendentes.
- NA – Número Médio de Clientes Sendo Atendidos.
- NF – Número Médio de Clientes na Fila.
- NS – Número Médio de Clientes no Sistema.
- PMI – Project Management Institute.
- SMED – Single Minute Exchange of Die.
- TA – Tempo Médio de Atendimento.
- TF – Tempo Médio de Permanência na Fila.
- TPM – Total Productive Maintenance.
- TS – Tempo Médio de Permanência no Sistema.
- VSM – Value Stream Mapping.
- WIP – Working In Process.
- ρ – Taxa de Utilização dos Atendentes.
- λ – Ritmo Médio de Chegada.
- μ – Taxa Média de Atendimento.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CRONOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DA ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO.....	7
FIGURA 2: MODELOS DE TRANSFORMAÇÃO.	9
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE PROCESSOS DE MANUFATURA.	11
FIGURA 4: EXEMPLO DE ARRANJO FÍSICO POSICIONAL.	13
FIGURA 5: EXEMPLO DE ARRANJO FÍSICO POR PROCESSO.	14
FIGURA 6: EXEMPLO DE ARRANJO FÍSICO CELULAR.	14
FIGURA 7: EXEMPLO DE ARRANJO FÍSICO POR PRODUTO OU LINHA.	15
FIGURA 8: DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS BÁSICOS DE ARRANJOS FÍSICOS.	15
FIGURA 9: GRÁFICO COM A IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS INDICADORES.....	18
FIGURA 10: CICLO DE ATIVIDADES A SEREM REALIZADAS EM UM SMED.....	21
FIGURA 11: RELAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS E DESPERDÍCIOS DA MANUFATURA ENXUTA.	22
FIGURA 12: EXEMPLO DE UM VSM.....	23
FIGURA 13: PRINCIPAIS FERRAMENTAS DO VSM.	24
FIGURA 14: ELEMENTOS DE UMA FILA CONFORME.....	26
FIGURA 15: POSIÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE FILAS.	28
FIGURA 16: RAMIFICAÇÃO DOS TIPOS DE EXPERIMENTOS EM UM SISTEMA.....	31
FIGURA 17: DIFERENTES TIPOS DE SIMULAÇÃO.	32
FIGURA 18: EXEMPLO DE MODELO CONTÍNUO.....	33
FIGURA 19: EXEMPLO DE MODELO DE EVENTOS DISCRETOS.	34
FIGURA 20: FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES EM UM PROJETO DE SIMULAÇÃO.	36
FIGURA 21: FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES EM UM PROJETO DE SIMULAÇÃO.	37
FIGURA 22: ESQUEMA SIMPLIFICADO DA OTIMIZAÇÃO.....	38
FIGURA 23: DISTRIBUIÇÃO NORMAL EM MODELO GRÁFICO.	41
FIGURA 24: DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL EM MODELO GRÁFICO.	42
FIGURA 25: FORMA GRÁFICA DA POISSON.	43
FIGURA 26: DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL NEGATIVA.....	44
FIGURA 27: ETAPAS DA METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO.	45
FIGURA 28: FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO MODELO PROPOSTO.....	48
FIGURA 29: ETAPAS DO CASO 1.	54
FIGURA 30: FASES DA REESTRUTURAÇÃO DA EMPRESA ESTUDADA.	55
FIGURA 31: VSM ATUAL.....	55
FIGURA 32: LAYOUT DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE VÁLVULAS.....	56
FIGURA 33: DADOS COLETADOS DO PROCESSO.....	57
FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA CASQUEIRA.	58
FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FORNO.....	58
FIGURA 36: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA REBARBAÇÃO.	58
FIGURA 37: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA MONTAGEM.	59
FIGURA 38: MODELO DIGITAL COMPLETO.	59

FIGURA 39: RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DA OTIMIZAÇÃO.	61
FIGURA 40: ETAPAS DO CASO 2.	63
FIGURA 41: TEMPOS DE SETUP.	64
FIGURA 42: ESTADO ATUAL DOS FORNOS.	65
FIGURA 43: PRIMEIRO CENÁRIO FUTURO.	66
FIGURA 44: SEGUNDO CENÁRIO FUTURO.	67
FIGURA 45: TERCEIRO CENÁRIO FUTURO.	67
FIGURA 47: ETAPAS DO CASO 3.	69
FIGURA 48: VSM ATUAL, OXICORTE.	70
FIGURA 49: VSM FINAL, CORTE A SERRA.	71
FIGURA 50: TRATAMENTO DOS DADOS DO CARREGAMENTO.	73
FIGURA 51: TRATAMENTO DOS DADOS DO DESCARREGAMENTO.	73
FIGURA 52: TRATAMENTO DOS DADOS DA REBARBAÇÃO.	74
FIGURA 53: MODELO DO ESTADO ATUAL DO PROCESSO DE CORTE.	75
FIGURA 54: MODELO DO CENÁRIO 2 DO SISTEMA DE CORTE.	76
FIGURA 55: DADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CORTE POR OXICORTE.	76
FIGURA 56: DADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CORTE POR SERRA.	77
FIGURA 57: ETAPAS DO CASO 4.	79
FIGURA 58: VSM DO ESTADO ATUAL.	80
FIGURA 59: DISTRIBUIÇÃO QUE REPRESENTA O HISTÓRICO DE FALHAS NO SISTEMA.	81
FIGURA 60: MODELO DE SIMULAÇÃO.	82
FIGURA 61: LAYOUT INICIAL.	83
FIGURA 62: NOVO LAYOUT DO SISTEMA.	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA REAL E SIMULADO.	60
TABELA 2: CAPACIDADE DOS ESTOQUES PARA OTIMIZAÇÃO.	61
TABELA 3: TABELA COMPARATIVA ENTRE PRODUÇÃO REAL E SIMULADA.	66
TABELA 4: TABELA COM TC DO CORTE E REBARBAÇÃO.	70
TABELA 5: TABELA COM OS DADOS COLETADOS NO PROCESSO.	72
TABELA 6: TABELA COMPARATIVA ENTRE PRODUÇÃO REAL E SIMULADA.	75
TABELA 7: INFORMAÇÕES COMPARATIVAS ENTRE OS CENÁRIOS 1 E 2.	77
TABELA 8: QUADRO DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA SIMULADO.	82
TABELA 9: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS.	85

RESUMO

FERRO, Rodrigo. PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA MELHORIA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO BASEADA NA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E MANUFATURA ENXUTA. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste.

Esta dissertação tem como objetivo propor um método para integrar a simulação de eventos discretos com as ferramentas da manufatura enxuta em casos de melhoria de sistemas de produção, no qual este método foi validado em quatro casos diferentes. Para o embasamento teórico necessário foi realizada pesquisas em artigos e livros recentes sobre os temas: simulação; manufatura enxuta e sistemas de produção. Ao final do estudo concluiu-se que este método foi importante para a tomada de decisões e determinante para a melhoria dos sistemas de produção estudados.

PALAVRAS-CHAVES: Simulação de eventos discretos; Manufatura enxuta; Distribuições estatísticas; Teoria das filas.

ABSTRACT

FERRO, Rodrigo. PROPOSAL OF A METHOD FOR IMPROVEMENT OF PRODUCTION SYSTEMS BASED ON SIMULATION OF DISCRETE EVENTS AND LEAN MANUFACTURING. 2014. 96 f. thesis (master's degree in production engineering) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

This paper aims to propose a method for integrating simulation of discrete events with the tools of lean manufacturing in cases of improvement of production systems, in which this method has been validated in four different cases. For the theoretical background necessary research has been conducted in recent articles and books on the subjects: simulation; lean manufacturing and production systems. At the end of the study it was concluded that this method was important for making decisions and determining the improvement of production systems studied.

KEYWORDS: Simulation of discrete events; Lean manufacturing; statistics distributions; queuing theory.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a globalização foi um importante agente de mudança no cenário comercial mundial, sendo considerada uma difusão econômica, social e cultural entre diversos povos do mundo (UNDERWOOD, 2012).

Segundo Corrêa e Corrêa (2012), os sistemas de produção inseridos em mercados globalizados estão sujeitos a mudanças por conta de variáveis das mais diversas ordens, como: variações cambiais, taxa de juros, mudanças políticas. Inman *et al.*, (2011) acrescentam como variáveis as questões de catástrofes climáticas e conflitos armados.

Em um estudo sobre variações dos mercados globalizados, Kaya (2010) destaca o aumento do poder de compra em países com economia livre ou de baixas restrições. Este aumento ocorreu em função dos postos de trabalho criados em diversos segmentos.

Em seu trabalho, Dreher, Gassebner e Siemers (2012) estudaram o aumento da concorrência em mercados de economia livre, ou com baixas restrições, o qual eleva a necessidade de evolução dos sistemas de produção ao que se refere a qualidade, preço e prazo. Isso ocorre em função da concorrência entre empresas de diferentes locais podendo haver desigualdade nas condições de manufatura.

Outro ponto a ser abordado refere-se à relação entre margem de lucro e custo da produção. Comparando dois produtos que apresentam a mesma qualidade e em condições semelhantes de entrega e disponibilidade, é natural que o preço se torne um fator determinante para a escolha no momento da aquisição. No entanto, na maioria dos casos, o preço é um valor determinado pelo mercado consumidor e a margem de lucro de uma empresa está diretamente associada ao custo do sistema de produção, o que torna imprescindível a aplicação de práticas de redução dos custos da produção (LOPEZ; SANTOS; ARBÓS, 2013).

Neste sentido, Lopez, Santos e Arbós (2013) destacaram dois pontos de atenção em um sistema de produção: a quantidade de estoque em processo (*Work In Process* - *WIP*) e a eficiência da produção que está relacionada com a quantidade de tempo gasto na transformação.

Com isso, na visão de redução de custos de um sistema de produção, a aplicação da filosofia da manufatura enxuta destaca-se, uma vez que tem como objetivo reduzir os principais desperdícios encontrados nos sistemas de produção (WOMACK; JONES; ROOS, 1997).

Enfatizando a importância da redução do custo por meio do sistema de produção, Erjavec, Gradisar e Trkman (2012), desenvolveram um trabalho para reduzir o custo do produto com a redução da quantidade de peças em estoque. Neste caso, um modelo matemático foi desenvolvido para estimar o tamanho ideal de estoque sem elevar os riscos de atraso para o cliente.

Em função destas variáveis, muitas empresas estão desenvolvendo sistemas de produção ágeis e flexíveis para se adaptar a variações por meio da manufatura enxuta (BARROS *et al.*, 2005).

Em um estudo prático, Joseph e Sridharan (2011) desenvolveram um modelo de rotas flexíveis, no qual a escolha dos equipamentos utilizados foi considerada uma variável e a simulação foi utilizada para definir o ponto ótimo do processo. Ao final do trabalho, houve diminuição do *lead time*, aumento da porcentagem de utilização dos equipamentos de transporte e aumento da utilização das máquinas envolvidas no processo de transformação.

Neste caso destaca-se o uso da simulação como ferramenta para avaliação de cenários, o qual está cada vez mais inserido no desenvolvimento de sistemas de produção que atendam os requisitos da manufatura enxuta.

Segundo Freitas (2001) a simulação permite que vários cenários com diferentes configurações sejam avaliados na busca do cenário ideal. Law e Kelton (1991) apontam a utilização da simulação para as seguintes situações: desenvolver e analisar sistemas de manufatura; melhorar e analisar sistemas de atendimento; analisar sistemas financeiros e econômicos; desenvolver e analisar sistemas de transporte; evoluir sistemas de comunicação; apoiar a tomada de decisões.

Como exemplo de aplicação da simulação, destaca-se o estudo de caso de Aomar (2011), o qual utilizou a simulação para aplicar as ferramentas da manufatura enxuta na ótica de três indicadores: produtividade; tempo de ciclo e WIP. Como forma de validar o cenário desenvolvido na simulação, foi utilizada a lei de *Little*. Ao final do estudo, chegou-se à conclusão que o resultado encontrado por meio da simulação era equivalente aos resultados calculados segundo a lei de *Little*.

Em outro exemplo, Baykasoğlu e Durmuşoğlu (2011) desenvolveram um trabalho para avaliar a implantação de um processo flexível por meio de simulação. A definição do fluxo do material, as estratégias de saída dos produtos e as estratégias de espera foram modeladas para determinar qual o melhor cenário a ser escolhido tomando como base a variedade de produtos. Ao final do estudo, houve redução na quantidade de peças durante o processo de fabricação e o aumento na variedade de produtos não teve impacto negativo no atendimento dos pedidos.

1.1. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Visando atender às necessidades de melhoria dos sistemas de produção citados acima, as empresas estão investindo em alternativas que contribuam com as tomadas de decisões, dentre as quais, a simulação destaca-se como uma ferramenta para o desenvolvimento de estudos que consiste na criação de modelos virtuais que permitam estudar as variáveis de um sistema de produção impostas pelo dinamismo do mercado globalizado.

A aplicação da simulação apresenta as seguintes vantagens (FREITAS, 2001):

- os modelos digitais representam as condições reais do meio analisado e possibilitam o maior entendimento do processo atual;
- possibilita a criação de cenários futuros sem a influência no ambiente real que está sendo analisado;
- capacidade de extrapolar os valores das variáveis modeladas e conhecer como o sistema simulado se apresentaria em condições extremas;
- possibilita a otimização do sistema com o dimensionamento dos recursos utilizados para a manufatura ou sistema de atendimento;
- reduz o tempo de implantação de projetos, já que os testes realizados no ambiente real são reduzidos devido aos testes virtuais;
- reduz o custo de implantação de projetos relacionados à evolução de sistemas de produção;
- aumenta o índice de assertividade das decisões tomadas.

Com o aumento da utilização da simulação, vários *softwares* vêm sendo desenvolvidos para facilitar a utilização por meio de interfaces mais interativas, ferramentas ou módulos que se aproximam cada vez mais da realidade (SAKURADA e MIYAKE, 2009).

Em um trabalho desenvolvido por Abdulmalek e Rajgopal (2007), a simulação foi aplicada para justificar a implantação de ferramentas da manufatura enxuta em uma siderúrgica. Neste caso, o mapa do fluxo de valor ou VSM (*Value Stream Mapping*) apresentou a necessidade de implantação de ferramentas como Kanban, TPM (*Total Productive Maintenance*) e SMED (*Single-Minute Exchange of Die*). A liberação dos investimentos para o projeto com estas melhorias ocorreu após a comprovação do efeitos da melhorias por meio da simulação.

Em outro trabalho Gurumurthy e Kodali (2011) desenvolvem o VSM futuro por meio de experimentos feitos em software de simulação. Ao final do trabalho a empresa de médio porte, fabricante de portas e janelas, foi capaz de aumentar a eficiência produtiva por meio de ferramentas da manufatura enxuta.

Chee, Chong e Chin (2012) utilizaram simulação e o VSM para avaliar as melhorias da implantação do kanban e da técnica do *milk-run* (*milk-run* é uma forma de planejamento de entregas ou retiradas de produtos de maneira periódica e constante) em um sistema para a coleta de placas eletrônicas de uma empresa fabricante de componentes automotivos da Malásia.

A simulação também pode ser usada para avaliar serviços e atendimentos. Sakurada e Miyake (2009) analisaram dois casos: um para avaliar o sistema de atendimento da biblioteca da universidade; e outro para avaliar o layout e o atendimento de um restaurante.

Em um exemplo de comparação de modelos de células de usinagem, Renna e Ambrico (2011) utilizaram a simulação para comparar o modelo existente com dois outros modelos: *fractal manufacturing systems* e *remainder cell*. Neste trabalho os parâmetros de comparação foram: quantidade de peças fabricadas; quantidade de estoque em processo (WIP); frequência de saída dos lotes e taxa de utilização das máquinas.

1.2. OBJETIVO

Para uma plena compreensão dos objetivos deste trabalho, os mesmos foram separados entre objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral propor um método para melhorar sistemas de produção baseado na integração das ferramentas de simulação de eventos discretos com a filosofia da manufatura enxuta.

1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos foram desdobrados e listados abaixo:

- Aplicar a integração entre o VSM e o sistema de simulação;
- Aplicar um método para validação do modelo simulado do sistema de produção com o modelo real;
- Avaliar a influência da variação dos dados de entrada que caracterizam o sistema de produção no resultado final da simulação.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é dividida em sete capítulos descritos a seguir.

No capítulo 1 encontra-se a introdução deste trabalho com a contextualização e justificativa do problema em questão além do objetivo geral e dos objetivos específicos.

O referencial teórico encontra-se no capítulo 2, o qual foi dividido em três partes. Na primeira parte estão os tópicos referentes à caracterização de um sistema de produção. A segunda parte foi destinada a filosofia da manufatura enxuta, na qual foram abordados os temas históricos, os sete desperdícios, as principais ferramentas da manufatura enxuta e aplicações destas. Por fim

abordou-se a simulação, conceitos e caracterizações, teoria das filas, distribuições estatísticas e aplicações da simulação estão presentes nesta parte do trabalho.

O capítulo 3 destina-se à metodologia científica da dissertação. Para isso foram abordados os conceitos de estudos de caso e da simulação. O fluxo das atividades deste trabalho também é detalhado neste capítulo.

No capítulo 4 estão descritas as características do modelo proposto nesta dissertação.

O capítulo 5 traz os resultados e a discussão da aplicação do modelo proposto em quatro casos.

Em seguida, o capítulo 6 aborda a conclusão do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A literatura utilizada nesta dissertação baseou-se em livros e artigos científicos sobre os seguintes temas: sistemas de produção; ferramentas e aplicações da manufatura enxuta, simulação, teoria das filas e ferramentas estatísticas.

2.1. SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Quando a humanidade começava a construir grandes obras na antiguidade, alguns conceitos da administração da produção certamente foram utilizados. Atividades como gerenciamento de recursos humanos, distribuição e movimentação de insumos ou materiais, além do acompanhamento cronológico das obras são essenciais para qualquer projeto de construção, seja para a construção de uma obra única ou uma produção em série de um produto qualquer (CORRÊA e CORRÊA, 2012).

Gaither e Frazier (2002) destacaram 6 (seis) marcos históricos que contribuíram para a evolução do gerenciamento da administração de sistemas de produção e operações, e que podem ser observados de forma cronológica na Figura 1.



Figura 1: Cronologia do desenvolvimento da administração da produção.

Fonte: Gaither e Frazier (2002).

Em meados do século XVII, na Inglaterra, iniciou-se a revolução industrial que substituiu a produção artesanal por máquinas. A partir deste momento, a aplicação da mão de obra foi realizada de forma ordenada e novos métodos de produção mecanizados passaram a fazer parte dos sistemas de manufatura. Outro ponto importante neste movimento foi o início da ideia de padronização dos produtos fabricados.

Em 1775, James Watt apresentou o motor a vapor, considerado a invenção mais importante da revolução industrial, o qual, em 1776, foi instalado pela primeira vez por John Wilkinson em uma usina de ferro. Em 1781, Watt aperfeiçoou a tecnologia conseguindo assim, transformar movimentos lineares em circulares (HOOP e SPEARMAN, 2013).

Ao final da guerra civil americana, a população das cidades havia aumentado consideravelmente devido à migração do campo para os centros urbanos. Isto resultou em aumento da demanda por produtos manufaturados e disponibilidade de trabalhadores assalariados (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Com o aumento da demanda e com a necessidade crescente de melhorar a eficiência da produção, alguns modelos de produção foram implementados aos sistemas de produção. Dentre esses modelos destacaram-se o Fordismo e o Taylorismo. O Fordismo iniciou-se nas linhas de produção do automóvel Modelo T de Henry Ford em 1913, o qual alavancou a produção em massa por meio de um inovador sistema de montagem em linha. Isto permitiu o aumento da produção e a redução do custo do produto (HOOP e SPEARMAN, 2013).

O Taylorismo destacou-se por apresentar o conceito de padronização de processos de fabricação, gestão dos tempos de operação e a especialização dos recursos humanos em função da operação (GAITHER e FRAZIER, 2002).

No início da produção em massa, os postos de trabalho eram projetados sem a preocupação com as condições de segurança e saúde do trabalho, sendo que somente no período entre as duas grandes guerras, iniciaram-se estudos relacionando à eficiência com o ambiente de produção e com a motivação dos operadores (GAITHER e FRAZIER, 2002).

Inúmeras técnicas, desenvolvidas durante a segunda guerra mundial, passaram a ser aplicadas para desenvolver modelos para auxiliar as tomadas de decisões no ambiente industrial. Inicia-se uma abordagem dos problemas industriais baseada em características multidisciplinares, em grupos de

trabalho e em uma visão holística do sistema de produção (HOOP e SPEARMAN, 2013).

Após os marcos destacados anteriormente, Hoop e Spearman (2013) citam outros acontecimentos históricos que tiveram influência nos sistemas de produção, dentre eles: a globalização; o avanço dos sistemas computacionais; as tendências em aumentar a eficiência da manufatura e a qualidade dos produtos.

Desta forma, um sistema de produção pode ser compreendido por três elementos fundamentais: *input* – *processamento* – *output*. A Figura 2 ilustra a visão de um sistema de produção elaborado por Slack *et al.* (1999).

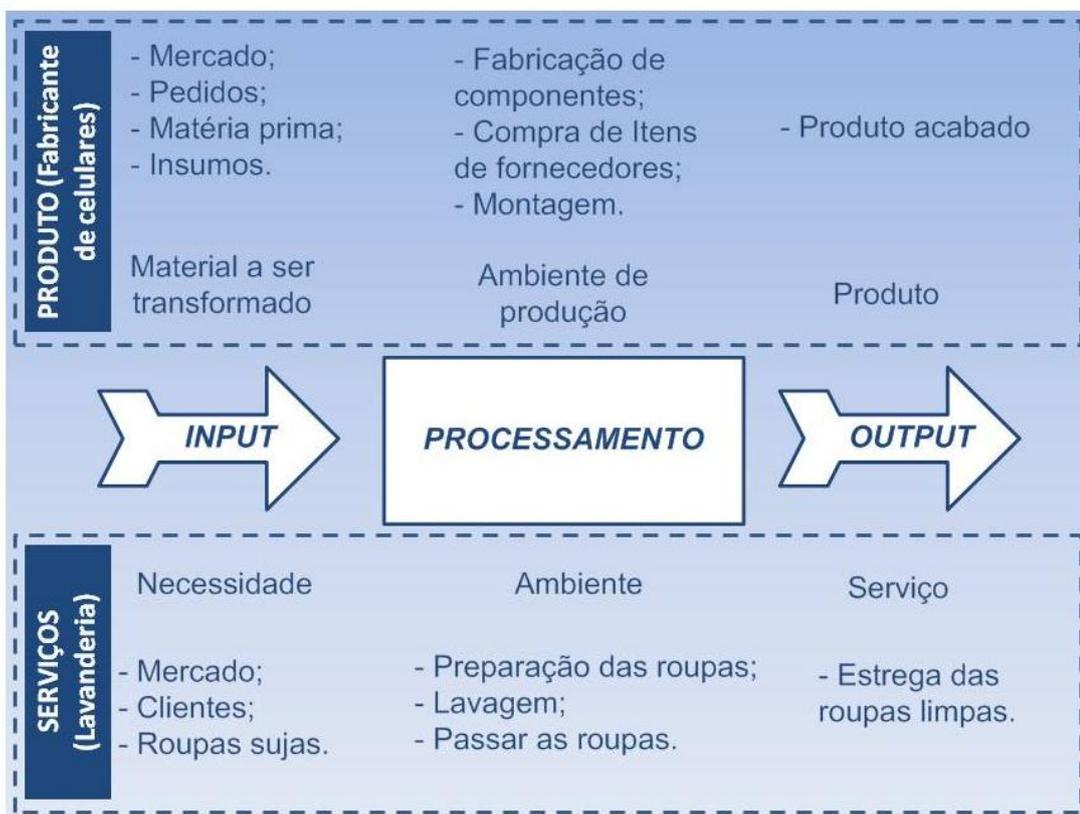


Figura 2: Modelos de transformação.

Fonte: Slack *et al.* (1999).

O modelo ilustrado na Figura 2 pode ser utilizado para definir um sistema de transformação de produtos (Por exemplo: produção de aparelhos celulares) e/ou prestações de serviços (Por exemplo: serviço de lavanderia).

Além disso, um sistema de produção pode ser caracterizado em função das variáveis que atuam sobre as suas operações. Estas características impactam diretamente nos indicadores do processo de manufatura. Slack *et al.* (1999) apontaram quatro dimensões em um sistema de produção: volume; variedade; variação de demanda e contato com o consumidor.

Para compreender as diferenças de um sistema de produção em função destas dimensões pode-se considerar o custo de produção como um indicador de comparação. Desta forma têm-se:

- o volume de produção será decisivo para caracterizar o método de produção, a sua dimensão e o seu custo operacional, ou seja, um sistema de produção com alto volume permitirá que os custos fixos sejam diluídos, fazendo que haja um menor impacto sobre os custos finais do produto. Da mesma forma, o inverso é válido para um sistema de produção com baixo volume (LOPEZ; SANTOS e ARBÓS, 2013);
- quando uma empresa possui uma variedade alta de produtos, alguns pontos devem ser destacados para não comprometer o custo de fabricação. Em uma pesquisa realizada com empresas espanholas Camisón e Lopez (2010) apontam a importância da flexibilidade em empresas com grande variedade de produtos;
- o entendimento da variação da demanda é algo fundamental para o planejamento estratégico de uma empresa. Questões como o planejamento da produção, venda, estoque, finanças, mão de obra e compras são diretamente afetados pelas previsões de demanda, podendo causar impactos diretos no custo de fabricação de um produto (TUBINO, 2009); e
- a dimensão contato com o consumidor reflete diretamente no custo da produção e no tipo de arranjo físico dos recursos. Como exemplo tem-se a diferença entre uma confecção de roupas, na qual o fato de não existir o contato com o cliente permite um planejamento da produção focado na redução dos custos, padronização das operações e aumento do volume, e uma costureira e/ou alfaiate, nos quais o contato direto com o consumidor faz com que o sistema tenha um volume baixo (normalmente unitário), variedade alta e conseqüentemente um sistema de produção flexível (SLACK *et al.* 1999).

As variações de volume e demanda criam características no processo de produção que são definidas por Slack *et al.* (1999) como tipos de processos de manufatura. A Figura 3 distribui os principais tipos considerando duas variáveis: volume e variedade.

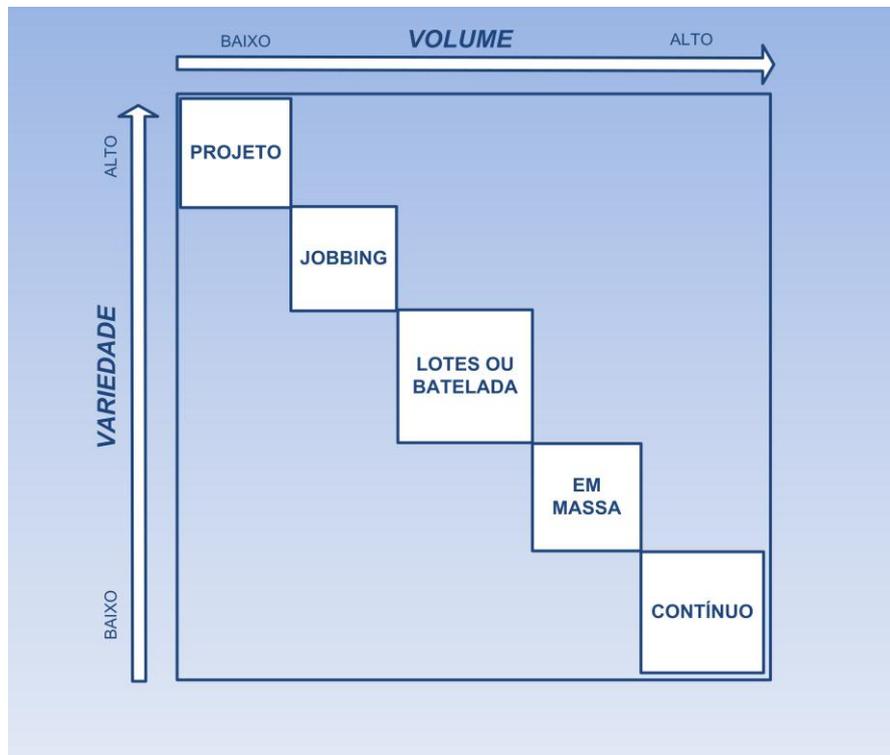


Figura 3: Distribuição dos tipos de processos de manufatura.

Fonte: Slack *et al.* (1999).

Como pode ser observado na Figura 3, tem-se cinco diferentes tipos de processos de manufatura:

- *Processos de projeto*: Conceitualmente, segundo o PMI Institute, 2013, todos os projetos são únicos, com escopo, prazos e investimentos bem definidos. Baseado nesta definição, empresas que trabalham com a fabricação baseada em projetos possuem uma variedade alta de produtos e o volume baixo. Como exemplo pode se citar uma construtora que atua na construção civil, a qual pode ter distintos projetos, tais como: uma ponte, um edifício, etc...
- *Processo jobbing*: Os processos de jobbing também possuem baixo volume e alta variedade, porém o que diferencia do processo de projeto é que os recursos não ficam dedicados exclusivamente a um projeto, um

exemplo é uma ferramentaria que fabrica moldes para injeção plástica que são únicos, porém esta empresa pode estar usando os mesmos recursos humanos ou máquinas na fabricação de outros moldes.

- *Processo de lote ou batelada:* Quando são fabricadas duas ou mais peças (a tendência é que seja um volume alto) de um mesmo modelo de forma sequencial é considerada fabricação em lote ou batelada. Costumeiramente as empresas que trabalham sobre este modelo de processo possuem um grande volume e baixa variedade de produtos a serem fabricados. Como exemplo deste modelo uma usinagem do ramo automobilístico ou fabricante de máquinas.
- *Processo de produção em massa:* os processos de produção em massa se caracterizam pelo alto volume e baixa variedade. Como exemplo, uma montadora de automóvel, na qual independente das variáveis existentes no produto, não existe a reconfiguração do sistema de produção. Outros exemplos são fabricantes de equipamentos eletrônicos ou de alimentos.
- *Processos contínuos:* Comparado com a produção em massa, o processo contínuo apresenta um volume maior e a variedade ainda menor, estes processos possuem características quase inflexíveis, os maiores exemplos são as siderúrgicas, a indústria petroquímica e fabricantes de papel.

Outra forma de caracterizar os sistemas de produção é utilizar como referência o tipo de arranjo físico, desta forma a disposição dos equipamentos e a distribuição dos departamentos de manufatura influenciam diretamente no fluxo de produção.

Definido por Corrêa e Corrêa (2012), arranjo físico é a maneira com que os equipamentos transformadores estão dispostos fisicamente dentro do ambiente de produção além de determinar a maneira pela qual os recursos transformados irão fluir dentro da fábrica.

Béranger (1989) destaca a importância dos projetos de circulação de materiais e pessoas nos sistemas de produção, para evitar desperdícios ao longo do processo de manufatura. Segundo Slack *et al.*, (1999) todos os arranjos físicos são derivados de quatro modelos básicos, são eles:

- *Arranjo físico posicional*: conhecido também como de posição fixa, tem como característica básica a movimentação dos recursos transformadores ao redor dos recursos a serem transformados. Este sistema é utilizado para montagem de navios, aviões e hidroelétricas, devido as dimensões seria difícil a movimentação do produto para os locais de transformação, desta forma o produto fica fixo em um local e os componentes, operadores e equipamentos se movem até o produto em fabricação conforme Figura 4.

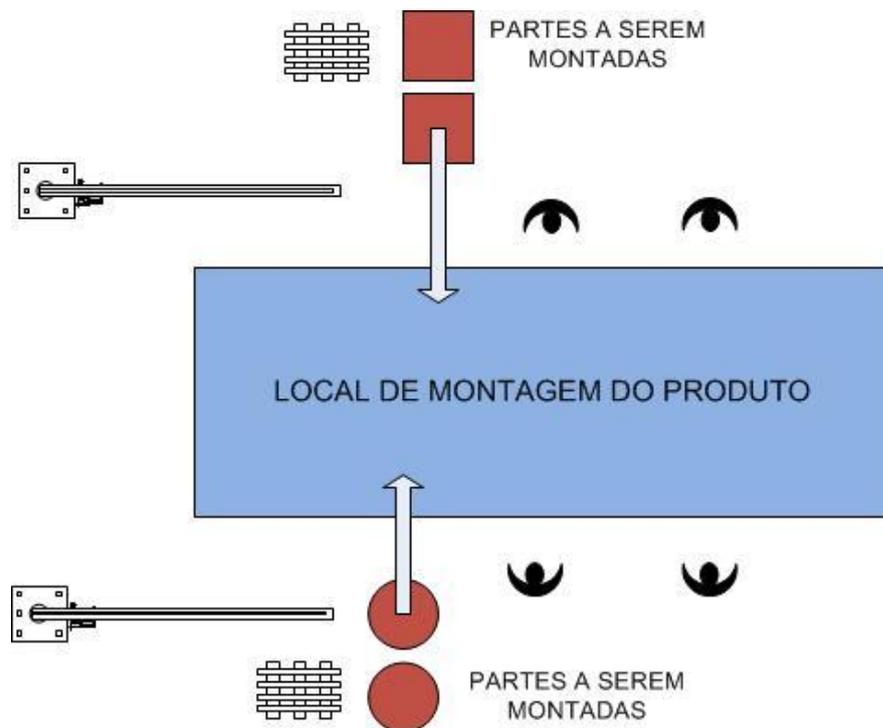


Figura 4: Exemplo de arranjo físico posicional.

Fonte: Próprio autor.

- *Arranjo físico por processo*: se caracteriza pela aproximação de processos e tecnologias semelhantes (TUBINO, 2009). Imaginando o processo de fabricação de um componente usinado que se move entre diversos setores como: corte, tornearia, tratamento térmico, e retífica, os equipamentos existentes em cada um dos setores possuem as mesmas características, a Figura 5 exemplifica este modelo.

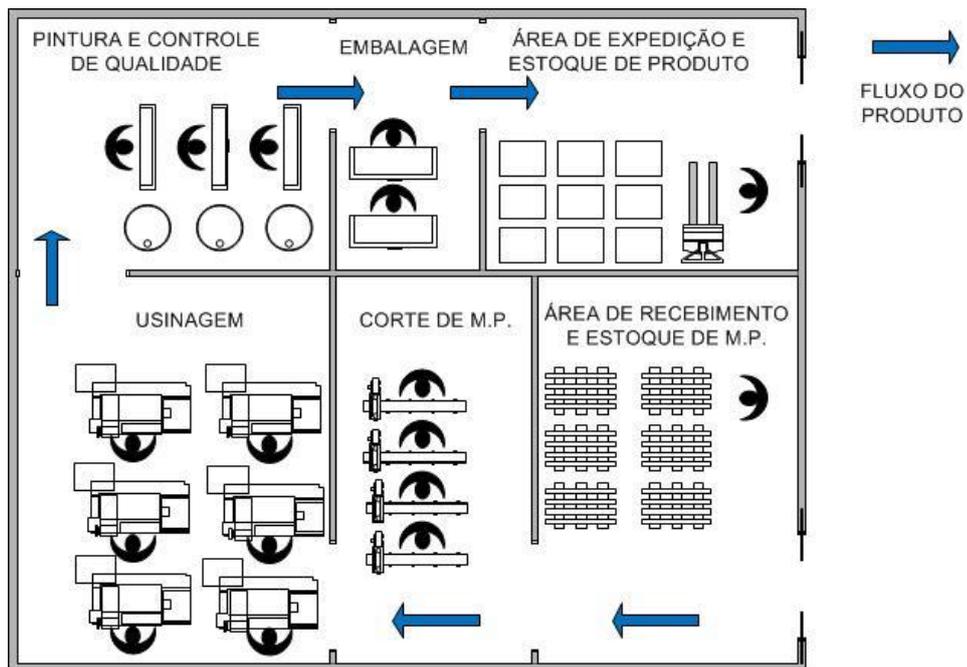


Figura 5: Exemplo de arranjo físico por processo.

Fonte: Próprio autor.

- **Arranjo físico celular:** O arranjo físico celular necessariamente reúne todos os recursos transformadores necessários para o processamento total ou parcial de um produto. Como exemplo pode-se citar uma empresa de televisores, na qual, em um determinado momento o produto entra em um local onde são montados e/ou testados componentes para atender um determinado requisito específico. A Figura 6 exemplifica uma célula de montagem.

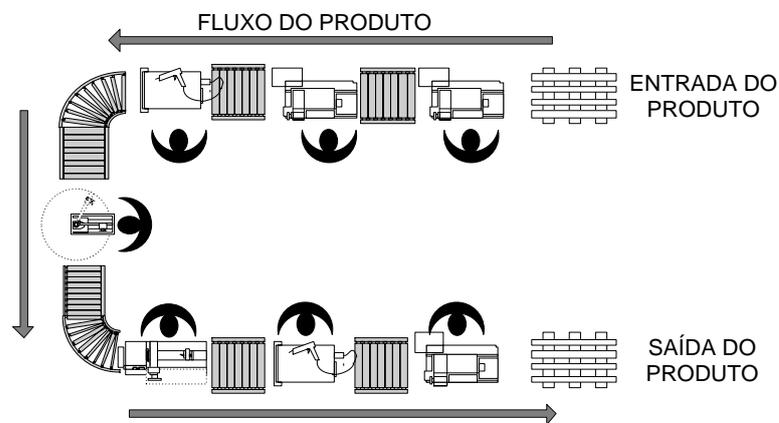


Figura 6: Exemplo de arranjo físico celular.

Fonte: Próprio autor.

- *Arranjo físico por produto:* Também conhecido como arranjo em linha, este modelo de arranjo consiste em reunir de forma sequencial todas as fazes necessárias para a manufatura ou montagem de um produto específico. O exemplo mais usado para este arranjo é a linha de montagem de automóveis, que pode ser vista na Figura 7.

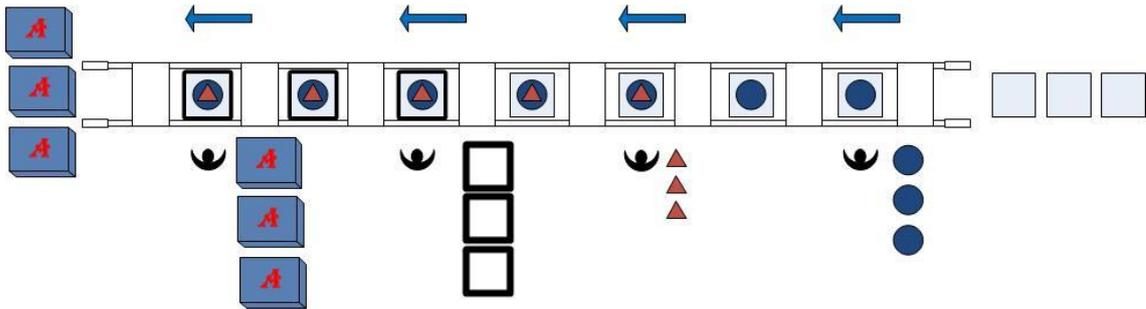


Figura 7: Exemplo de arranjo físico por produto ou linha.

Fonte: Próprio autor

A escolha do modelo de arranjo físico está diretamente relacionada com o tipo de processo de manufatura. A Figura 8 relaciona volume, variedade e fluxo com os diferentes tipos de arranjos físicos.

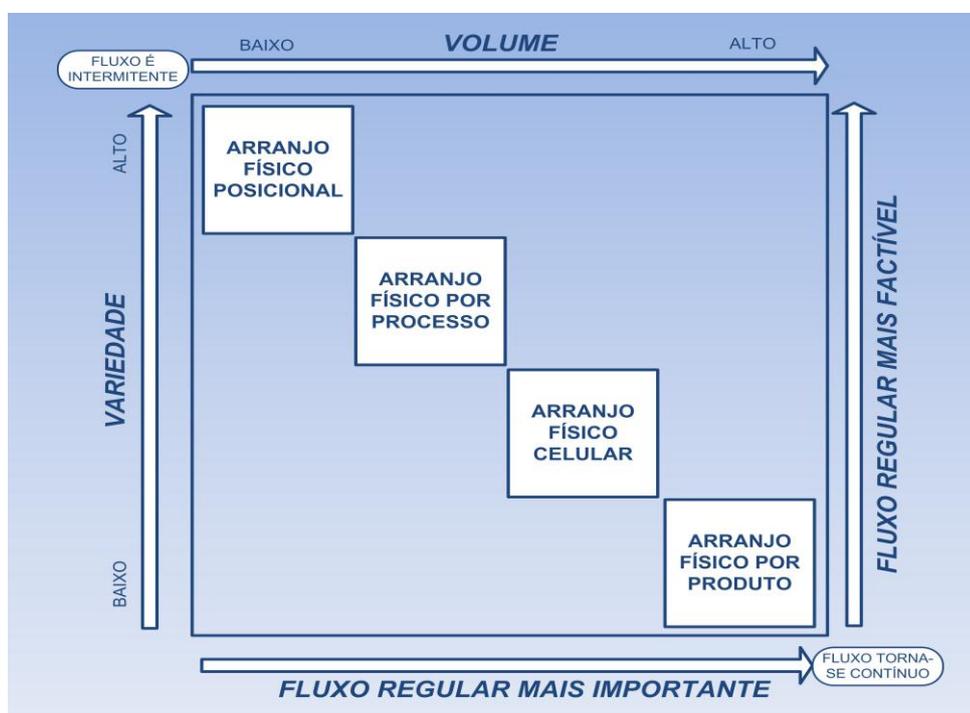


Figura 8: Distribuição dos tipos básicos de arranjos físicos.

Fonte: Slack *et al.* (1999).

Independentes das características do sistema de produção são utilizados indicadores de desempenho para avaliar o rendimento do sistema. No próximo tópico serão abordados cinco indicadores de desempenho.

2.1.1. INDICADORES DE DESEMPENHO

As avaliações e as tomadas de decisões envolvendo sistemas de produção devem ser fundamentadas por meio de indicadores que avaliem o sistema atual e forneçam informações necessárias para justificar eventuais mudanças.

Slack *et al.* (1999) destacam cinco indicadores fundamentais para qualquer sistema de produção, são eles: a qualidade, a rapidez, a confiabilidade, a flexibilidade e o custo.

Qualidade: Com a frase "*fazer a coisa certa da maneira certa*", Slack *et al.* (1999) afirma que a qualidade deve ser trabalhada nos sistemas de produção, já que seu bom desempenho gera satisfação e aumenta a confiança do consumidor. Suas bases bem definidas contribuem para a redução dos índices de retrabalho e perdas nos setores de operações.

Phan, Abdallah e Matsui (2011) apresentam um estudo em 27 empresas japonesas de manufatura que responderam um questionário sobre o grau de gerenciamento da qualidade nos anos da década de 1990 e nos anos da década de 2000 e seu impacto nas diferentes dimensões do desempenho corporativo. Os resultados apresentados neste estudo mostram a robustez e a estabilidade da gestão das companhias japonesas, considerado um diferencial comparando-se com os concorrentes de outros países.

Rapidez: "*Fazer as coisas com rapidez, diminuindo o tempo entre o pedido e a entrega aumenta a disponibilidade do atendimento*". Com esta frase Slack *et al.* (1999) ratificam a importância da rapidez na entrega do produto após o fechamento do pedido ou do atendimento, assim, a organização terá maior disponibilidade dos recursos.

Yang e Liu (2012) confirmam no trabalho desenvolvido que a agilidade é fundamental para as empresas contemporâneas, pois uma empresa ágil é aquela que entende e atende as necessidades de seus clientes de maneira rápida. Visando aumentar a agilidade e melhorar o desempenho da companhia, Cheng (2011) avalia a aplicação de sistemas modulares em *supply chain*, na qual, foi notório o aumento dos índices de agilidade.

Confiabilidade: Cumprir os prazos de entrega, os valores combinados e as condições acordadas fortalece a relação entre clientes e fornecedores, Slack *et al.* (1999) consideram este indicador de suma importância para a sobrevivência das empresas.

Visando atender os prazos de fornecimento, Lin e Cheng (2013) desenvolveram um trabalho, no qual, o arranjo das máquinas foi alterado com objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema de fabricação, evitando assim, possíveis falhas nas entregas.

Flexibilidade: Com o objetivo de definir flexibilidade, Slack *et al.* (1999) utilizam a frase "*fazer mudanças e adaptações no processo de produção, tratando os consumidores de forma individualista para melhorar o atendimento, mesmo que para isso enfrente situações inesperadas*". Tornar o sistema de produção mais flexível significa responder de maneira rápida as mudanças impostas ao processo como aumento da variedade de produtos, redução do tamanho dos lotes, atendimentos aviados entre outros.

Enxergando esta necessidade, vários estudos são realizados com o objetivo de tornar o sistema de produção mais flexível. Por exemplo, Cousens, Szejcowski e Sweeney (2009) desenvolveram um modelo comparativo entre layouts que aponta o melhor cenário do ponto de vista da flexibilidade. Joseph e Sridharan (2011) aplicaram a lógica *fuzzy* para definir a rota mais flexível em um centro de distribuição.

Custo: "Fazer as coisas o mais barato possível" Esta foi a frase colocada por Slack *et al.* (1999) para definir o objetivo custo. Este objetivo está diretamente relacionado aos outros quatro, já que mudanças no sistema de produção acarretam em mudanças no custo de fabricação do produto.

Como exemplo de aplicação destes indicadores, Slack *et al.* (1999) compararam dois serviços de transporte, ônibus e taxi. A Figura 9 ilustra a diferença entre os dois serviços baseada na importância relativa dada a cada um dos indicadores.

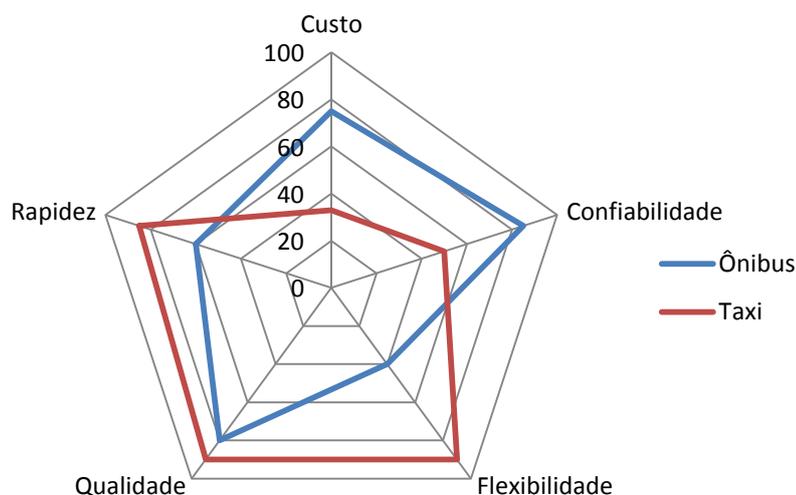


Figura 9: Gráfico com a importância relativa dos indicadores.

Fonte: Slack *et al.* (1999).

Conforme pode ser observado na Figura 9, o meio de transporte taxi destaca-se em função dos melhores indicadores de flexibilidade, qualidade e rapidez, enquanto que o meio de transporte ônibus apresenta melhores indicadores de confiabilidade e custo.

A crescente discussão sobre os fatores ambientais e sociais que vem ocorrendo nos últimos anos elevam a necessidade de criação de indicadores específicos sobre estes dois temas. Tachazawa (2002) afirma que corporações de qualquer segmento podem utilizar ações sociais e ambientais para fortalecerem suas marcas perante a sociedade.

Em meio a este cenário, dois novos indicadores de desempenho estão sendo utilizado, são eles, o indicador social e o indicador ambiental. Tseng (2013) afirma que os indicadores sustentáveis estão cada vez mais sendo utilizados para balizar as decisões tomadas por empresas privadas e governos.

Segundo Donaire (1999) os processos de produção não devem se ater apenas em transformar a matéria prima em produtos ou serviços e comercializá-los, mais do que isso, as empresas devem incorporar mudanças sociais e culturais que permitam que a sociedade solucione seus problemas, que de alguma forma estão relacionados com a própria empresa.

Uma forma de melhorar os índices encontrados nos indicadores de desempenho está relacionada com a aplicação da manufatura enxuta, em especial nos indicadores de custo, rapidez e flexibilidade. Visando conhecer melhor sobre a manufatura enxuta, o próximo tópico deste trabalho apresenta as principais ferramentas, os sete desperdícios e exemplos de aplicação.

2.2. MANUFATURA ENXUTA

Womack, Jones e Roos (1997) descrevem que o surgimento da manufatura enxuta teve sua origem na fábrica de automóvel *Toyota Motor Company*, o que fez com que este sistema fosse conhecido também como Sistema Toyota de Produção. A manufatura enxuta é considerada uma filosofia incorporada ao sistema de produção que tem como objetivo reduzir os desperdícios do processo de fabricação.

Para isso são mapeados sete tipos de desperdícios existentes em um sistema de produção e utilizadas ferramentas específicas para gerenciar e melhorar a produção. Os desperdícios são:

- superprodução: consiste em produzir além do necessário, a superprodução é considerada um dos maiores problemas dentro de um sistema de produção;
- espera: é o tempo em que o produto fica esperando para ser processado;
- defeito: o produto ou a operação realizada de forma incorreta, em alguns casos ocasiona retrabalhos ou descarte;
- transporte: é o desperdício referente à movimentação do produto no sistema de produção, na maioria dos casos ocorre por causa de *layouts* incorretos;
- movimentação: refere-se à movimentação excessiva dos operadores no sistema de produção;
- processamento: executar tarefas que não agregam valor ao produto, como por exemplo: retrabalhos, medições ou atividades com qualidade acima do solicitado;

- estoque: quantidade de material existente durante o processo, desde o estoque de matéria prima, passando pelo estoque durante o processo até o armazenamento do produto acabado.

Em 1950 Eiji Toyoda, realizou uma visita na fábrica *Rouge da Ford*, em Detroit, com o objetivo de conhecer o processo de fabricação em massa que conseguia montar 7.000 automóveis por dia. Ao retornar, Eiji chegou à conclusão que o revolucionário método de fabricação de Henry Ford ainda poderia ser aperfeiçoado.

Eiji Toyoda e Taichi Ohno iniciaram uma série de estudos com o objetivo de tornar o sistema de produção mais eficiente. Ao final dos estudos, algumas ferramentas foram desenvolvidas e aplicadas na manufatura da Toyota Motors. As principais ferramentas são: VSM; 5S; kanban; kaizen; poka yoke; SMED; TPM; fluxo contínuo; trabalho padronizado; heijunka box (Hoop e Spearman, 2013).

O SMED é aplicado em sistemas de produção para melhorar os indicadores de desempenho, Conseqüência *et al.* (2009) aplicaram a troca rápida de ferramenta em uma empresa do ramo eletrônico e informática que possui alta variedade de produtos. Benjamin, Murugaiah e Marathamuthu (2013); Singh e Khanduja (2010) utilizaram o SMED para melhorar os indicadores de disponibilidade dos equipamentos em diferentes sistemas de produção. Ao final do trabalho, pode-se concluir que esta ferramenta foi importante para o aumento da disponibilidade dos equipamentos.

A Figura 10 demonstra a sequencia de atividades a serem executadas quando a ferramenta do SMED é aplicada.

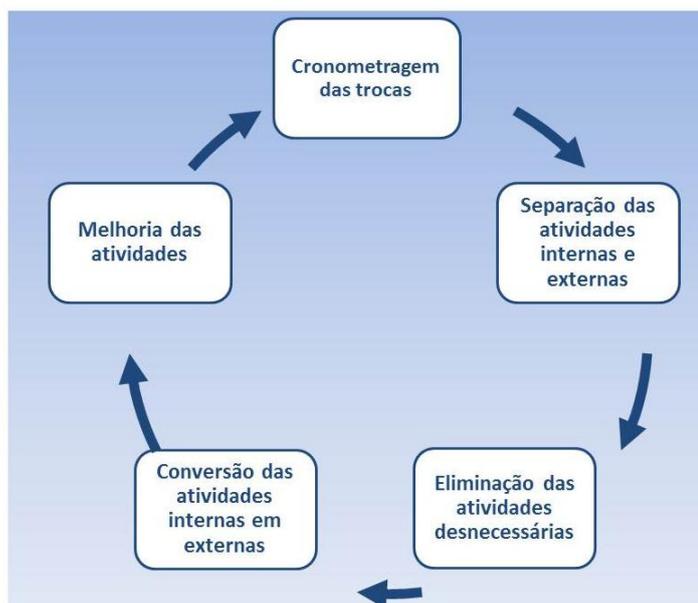


Figura 10: Ciclo de atividades a serem realizadas em um SMED.

Fonte: Womack, Jones e Roos (1997)

A ferramenta *kaizen* é utilizada como objeto de estudo por empresas e institutos de pesquisa por todo o mundo, Aken *et al.* (2010); Glover *et al.* (2013) e Marksberry (2010) avaliam as melhorias nos sistemas de produção de empresas que aplicaram o *kaizen*. Ao final do estudo, observaram que em todos os casos os objetivos são alcançados, em sua maioria, por meio de práticas que estimulam trabalhos em grupos focados na solução de um determinado problema da forma mais simples possível e rápida.

Em outro exemplo apresentado por Womack, Jones e Roos (1997), Ohno iniciou, em meados dos anos de 1960, o desenvolvimento dos conceitos do *just-in-time* (JIT) unido às ferramentas *kanban* e *heyjunka box*. O principal objetivo era produzir o produto certo na quantidade certa e no momento certo. Para isso foram utilizados cartões com gatilho para solicitar a entrega e fabricação dos itens que eram utilizados naquele momento. Com isso, destacou-se a importância do *kanban* no gerenciamento das atividades de produção, que produzia e entregava os produtos somente quando a estação seguinte estivesse precisando.

A ferramenta *kanban* proporcionou ao sistema de produção da Toyota um alto índice de controle dos volumes de estoque, além de dar apoio ao gerenciamento das atividades da produção. Diversas empresas e instituições de pesquisa ainda usam esta ferramenta como objeto de estudo como pode ser

observado nas obras de (PRICE, GRAVEL e NSAKANDA, 1994; TOPAN e AVSAR, 2011; MATZKA, MASCOLO e FURMANS, 2012).

Conforme observado na Figura 11, algumas ferramentas da manufatura enxuta são aplicadas na eliminação de mais de um desperdício do sistema de produção, sendo assim a mudança de um sistema tradicional para um sistema considerado enxuto, torna-se necessária a implantação de um conjunto de ferramentas.

SUPERPRODUÇÃO (Produzir além do necessário para o cliente)	X		X	X		X		X	X	X
ESPERA (Ociosidade dos recursos transformadores)	X	X		X		X	X	X	X	X
DEFEITO (Produtos ou operações realizadas incorretamente)	X			X	X		X	X	X	
TRANSPORTE (Longas distâncias percorridas pelo produto)	X	X		X				X	X	X
MOVIMENTAÇÃO (Excesso de movimentação de operadores)	X	X	X	X				X	X	X
PROCESSAMENTO (Execução de atividade que não agregam valor)	X		X	X	X	X	X	X	X	X
ESTOQUE (excesso de materia prima ou produto estocados)	X	X	X	X		X	X	X	X	X
DESPERDÍCIOS	VSM	5S	KANBAN	KAIZEN	POKA YOKE	SMED	TPM	FLUXO CONTÍNUO	TRABALHO PADRONIZADO	HEIJUNKA BOX
FERRAMENTAS										

Figura 11: Relação entre ferramentas e desperdícios da manufatura enxuta.

Fonte: Próprio autor.

Vinod e Arvind (2010) utilizam a ferramenta VSM para mapear o fluxo de valor em um sistema de produção de uma empresa de eixos e cames indiana com o objetivo de identificar os pontos de melhoria. No mapa do fluxo de valor inicial foram encontradas oportunidades de aplicação de ferramentas como 5S, kanban e melhorias no fluxo de informações. Ao final do trabalho houve redução no *lead time*, *cycle time* e *work in process*.

Chowdary e George (2012) aplicaram algumas ferramentas da manufatura enxuta como, 5S, fluxo contínuo e o VSM para melhorarem o sistema de produção em uma empresa farmacêutica. O VSM inicial foi desenhado e serviu como base para o desenvolvimento do VSM futuro, no qual foram inseridas

aplicações de 5S e organização do layout em formato de linha. Ao final do trabalho houve redução de 50% da quantidade de WIP na linha, redução do tempo total de processamento de 28 para 10 minutos além da redução de 37,5% da área utilizada no processo de fabricação.

Como pode ser visto nos exemplos de aplicação acima, a ferramenta VSM é utilizada para mapear o fluxo de valor de um produto, ou família de produtos. No VSM são realizadas anotações referentes às etapas de transformação e informação, desde a chegada da matéria prima até a disponibilização para o cliente, passando pelas operações de transformação, estoques e testes (SHOOK e ROTHER, 2003).

Segundo Shook e Rother (2003) o VSM é essencial, pois:

- ajuda a enxergar o fluxo total do sistema de produção;
- ajuda a identificar as fontes de desperdícios;
- torna visíveis as decisões sobre o fluxo futuro, facilitando a implantação dos novos conceitos no ambiente fabril;
- forma a base do plano de implantação da manufatura enxuta;
- mostra a relação ente fluxo de informação com o fluxo de valor.

A Figura 12 mostra o exemplo de um VSM que foi utilizado para mapear o sistema de produção de uma empresa fabricante de corpos fundidos para a fabricação de válvulas.

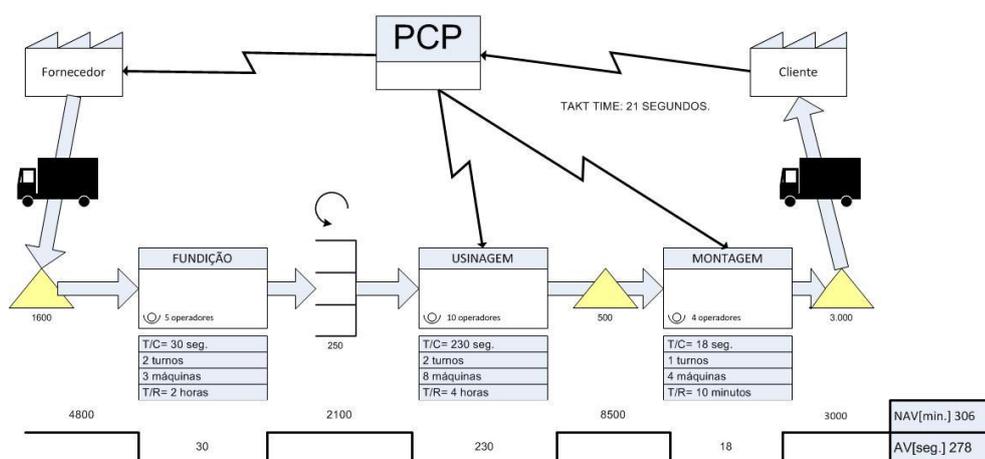


Figura 12: Exemplo de um VSM.

Fonte: Próprio autor.

Onde: T/C = Tempo de Ciclo; T/R – Tempo de Reparo; AV – Atividades que Agregam Valor ao produto e NAV – Atividades que Não Agregam Valor ao produto.

Conforme pode ser observado na Figura 12, o sistema de produção é composto por 5 operações (fundição, rebarbação, pintura, usinagem e montagem), sendo que o ritmo da produção para atender a demanda do cliente (*Takt time*) é de 6,75s e que a somatória dos tempos que agregam valor (AV) é de 49,5s. A somatória dos tempos que não agregam valor (NAV) é de 39,27s.

Em seguida na Figura 13 são apresentados os principais símbolos encontrados em um VSM para representar as atividades existentes em um sistema de produção.



Figura 13: Principais ferramentas do VSM.

Fonte: Shook e Rother (2003).

Sahoo *et al.* (2008) apresentaram a implantação da filosofia da manufatura enxuta em uma empresa de forjamento baseando-se no VSM como ferramenta para diagnosticar os problemas no chão de fábrica. Durante o estudo houve a necessidade de aplicação da ferramenta SMED para reduzir o tempo de setup. Ao final do projeto, os índices de redução de setup e de WIP foram considerados relevantes pelos pesquisadores.

Como pode ser observado, as ferramentas da manufatura enxuta estão presentes em diversos trabalhos que visam melhorar os indicadores dos sistemas de produção.

Visando aplicar a simulação como ferramenta para contribuir com os projetos de aplicação de manufatura enxuta, faz-se necessário abordar o tema da teoria das filas, pois este é base para o desenvolvimento da simulação.

2.3. TEORIA DAS FILAS

Fila é um elemento do cotidiano que está presente no dia-a-dia das pessoas que procuram algum tipo de atendimento. Sempre que a quantidade de pessoas ou peças chegando no sistema for maior que a capacidade de atendimento, haverá acúmulo ou fila. Filas podem ser encontradas em ambientes de produção, transportes, comunicações e em qualquer tipo de atendimento (PRADO, 1999).

O mau dimensionamento de um sistema de atendimento, conseqüentemente gerando filas, pode trazer prejuízo e incômodo, assim, este tema passou a ser trabalhado por meio de simulação e teoria das filas.

Lange, Samoilovich e Rhee (2013) aplicaram a teoria das filas para estimar a taxa de chegada à estação de atendimento de um setor em um aeroporto com o objetivo de dimensionar a quantidade de atendentes disponíveis para garantir a qualidade do atendimento. A validação dos novos cenários se deu por meio de simulação e os resultados identificaram que houve redução no custo desta operação. Isso se deu por meio da redução da quantidade de atendentes no setor estudado.

Em outra aplicação, Lin e Chen (2012) desenvolveram um modelo baseado na teoria das filas com o objetivo de avaliar um sistema de produção puxada gerenciado por meio da ferramenta *kanban*.

Para a avaliação e o dimensionamento de um sistema de socorro por meio de ambulâncias, Singer e Donoso (2008) utilizaram as técnicas da teoria das filas, no qual foram mapeadas as distribuições dos atendimentos utilizando um levantamento histórico, em seguida foi possível avaliar a necessidade de compra de novas ambulâncias para a frota.

Quando se deseja estudar as características de uma fila, é necessário conhecer os elementos que a compõem. A Figura 14 ilustra os elementos de uma fila.

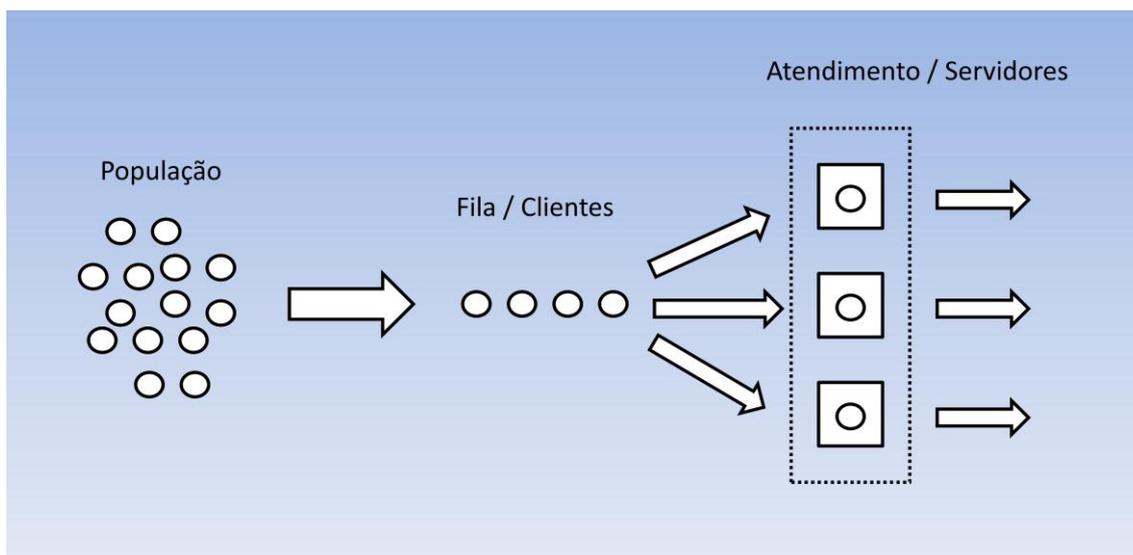


Figura 14: Elementos de uma fila conforme.

Fonte: Prado (1999).

Na Figura 14 tem-se que, de uma determinada população, são formadas as filas, e que esta aguarda por um atendimento. Desta mesma figura definem-se algumas características das filas conforme Prado (1999):

- Tamanho da população e cliente: um cliente ou um conjunto de clientes são parte de uma população, havendo uma relação direta entre o tamanho da população com a quantidade de clientes;
- processo de chegada: trata-se da entrada do indivíduo ou produto entrando no sistema de atendimento. Para estudar os processos de chegadas é necessário conhecer duas variáveis: a taxa média de chegada (λ), e o intervalo médio de chegada (IC). Em um sistema com 5 atendentes em que chegam 20 clientes em um minuto tem-se: $\lambda = 20$ clientes/min e IC = 3 s;
- processo de atendimento: este é o momento em que o atendente está realizando a ação, seja no atendimento de uma pessoa ou no processamento de uma peça. Utilizando o mesmo exemplo anterior, duas variáveis podem ser constatadas, o ritmo de atendimento (μ) para cada um dos atendentes que são 6 clientes por minuto ($\mu = 6$ clientes / min), e o tempo de atendimento (TA), 10 segundos por cliente (TA = 10 s/cliente).

- número de atendentes: é a quantidade de recursos disponíveis para executar o atendimento ou o processamento. A quantidade de servidores disponíveis para o atendimento deve ser dimensionada para equilibrar o custo do excesso de atendentes e ainda garantir a satisfação dos clientes ao ficar muito tempo nas filas;
- disciplina da fila: A ordem do atendimento caracteriza a disciplina da fila, os tipos mais comuns são: FIFO (sigla em inglês First In First Out) em português primeiro que entra, primeiro que sai; LIFO (Last In First Out), último a chegar e primeiro a ser atendido; Atendimento por prioridade; Atendimento aleatório ou Randômico;
- tamanho médio da fila: O tamanho médio de uma fila é dimensionado visando o conforto do cliente juntamente com a menor quantidade de atendentes possível, este equilíbrio é necessário para um bom sistema de atendimento;
- tamanho máximo da fila: esta característica da fila acontece em momentos que a entrada de clientes ou peças em um sistema de atendimento excede o tamanho do espaço físico disponível para acolher a demanda;
- tempo médio de espera da fila: na visão do cliente esta é a característica que causa maiores transtornos, em um exemplo de fila onde existem 10 indivíduos a frente, o tempo médio de espera na fila é igual 10 vezes o tempo médio de atendimento.

Continuando com as considerações conceituais referentes à teoria das filas, Prado (1999) apresenta os seguintes parâmetros.

TS = Tempo Médio de Permanência no Sistema

NS = Número Médio de Clientes no Sistema

λ = Ritmo Médio de Chegada

IC = Intervalo Médio de Chegada (IC = $1/\lambda$)

TF = Tempo Médio de Permanência na Fila

NF = Número médio de Clientes na Fila

TA = Tempo Médio de Atendimento ou de Serviço

ρ = Taxa de Utilização dos Atendentes

M = Quantidade de Atendentes

NA = Número Médio Clientes que estão sendo atendidos

μ = Ritmo Médio de Atendimento de cada atendente ($TA = 1 / \mu$)

A Figura 15 ilustra os parâmetros relacionados com a teoria das filas.

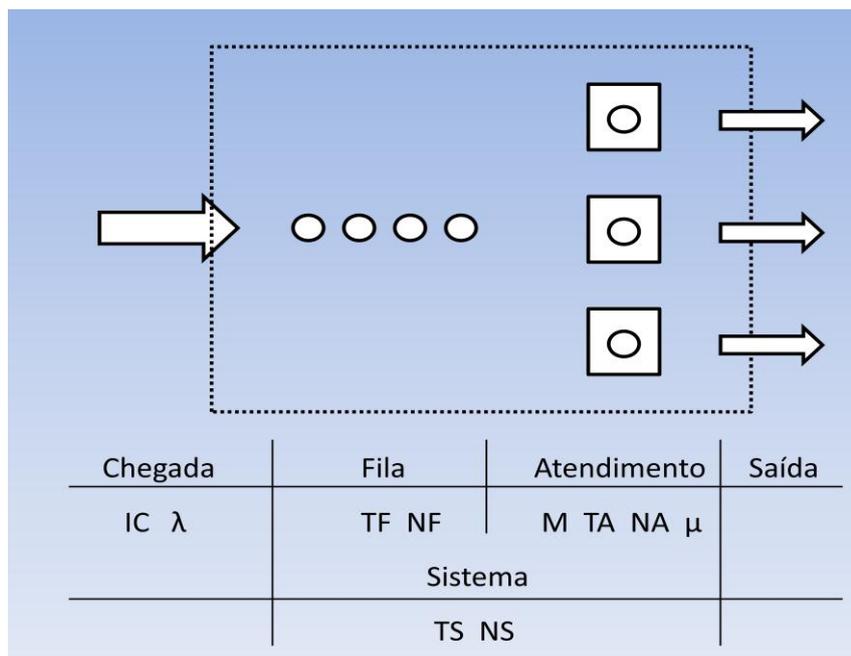


Figura 15: Posição dos parâmetros de um sistema de filas.

Fonte: Prado (1999).

Com o intuito de mostrar a estabilidade de um sistema de filas, J.D.C. Little apresentou as equações que são citadas por Hoop e Spearman (2013), em que o número médio de clientes na fila é apresentado na equação (1) e o número médio de clientes no sistema na equação (2):

$$NF = \lambda \cdot TF \quad (1)$$

$$NS = \lambda \cdot TS \quad (2)$$

Outras equações que podem ser utilizadas em trabalhos com a teoria das filas são citadas abaixo:

$$IC = \lambda \quad (3)$$

$$T_A = \mu \quad (4)$$

$$\rho = \lambda / M \cdot \mu \quad (5)$$

$$N_S = N_F + N_A \quad (6)$$

$$N_A = \lambda / \mu \quad (7)$$

Para representar situações reais e comuns no dia-a-dia, a teoria das filas apresenta um modelo com diferentes configurações. David Kendall desenvolveu a notação de Kendall para caracterizar o modelo da fila e pode ser descrita da seguinte forma: $A/B/c/K/m/Z$, em que:

A = descreve a distribuição de probabilidade dos intervalos de chegada;

B = descreve a distribuição que representa os tempos entre os atendimentos;

c = quantidade de atendentes;

K = capacidade máxima de clientes no sistema;

m = tamanho da população;

Z = disciplina da fila.

Segundo Hoop e Spearman (2013), a notação A e B dependem do tipo de distribuição utilizada e podem ser substituídas pelas seguintes nomenclaturas:

M: processos markovianos;

Em: distribuição genérica (todas exceto m);

Hm: Hiper-exponencial de estágio m;

Determinística;

Geral.

Desta forma, em uma notação $M/E2/5/20/\infty/FIFO$ pode-se dizer que trata-se de uma fila com chegada Marcoviana, atendimento Erlang de segundo grau, 5

atendentes, capacidade máxima do sistema 20 clientes, população infinita e atendimento por ordem de chegada (PRADO, 1999).

As distribuições de probabilidades estatísticas são de grande importância para representar os processos de atendimento e de chegada.

Após a abordagem sobre a teoria das filas é possível avançar para o tema simulação, que é um dos principais objetos deste estudo.

2.4. SIMULAÇÃO

Definida por Harrel *et al.* (2002), simulação é um processo de experimentação com um modelo detalhado de um sistema real, para avaliar como este sistema se comporta com mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno.

Freitas (2001) afirma que a simulação é a utilização de técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer operação ou processo do mundo real.

Law e Kelton (1991) defendem que a simulação é um modelo matemático, geralmente aplicado por meio de computadores, que representa um sistema real. Banks (1998) afirma que a simulação é a reprodução de um sistema real através de modelos matemáticos.

Embora os testes realizados em ambientes reais sejam ideais para avaliar as mudanças de um sistema, esta prática pode ser dispendiosa ao que se diz respeito a custo e tempo. Neste cenário, vários autores utilizam a simulação para resolverem problemas de tomadas de decisões em sistemas de produção.

Nomden e Zee (2008) desenvolveram um modelo de simulação contemplando informações como tempo de processamento, histórico de falhas e *set up*. O objetivo deste estudo foi desenvolver rotas para o fluxo de materiais e abastecimento para que as dificuldades de tempo de entrega dos produtos fossem minimizadas. Ao final do trabalho três pontos ficaram evidentes: (1) um pequeno número de rotas alternativas, na sua maioria é suficiente para este sistema, (2) a distribuição das rotas fixas é preferível, e (3) recursos secundários adicionais (novos equipamentos) são relevantes apenas em condições específicas.

Jeong e Phillips (2011) aplicaram a simulação em uma empresa fabricante de extintores de incêndio portáteis com o objetivo de avaliar qual o melhor *layout* dentre três tipos diferentes modelados. Ao final da simulação, um deles foi considerado a melhor opção para o sistema. Após isso o mesmo modelo foi utilizado para otimizar a quantidade de *pallets* necessários para abastecer a fábrica.

Vinod e Sridhaaran (2011) utilizaram a simulação para definir o melhor método de programação do sistema de produção, levando em conta o tempo total de manufatura do produto. Sete diferentes escalas de produção foram testadas no modelo de simulação e os resultados desta simulação foram submetidos a testes estatísticos para validar os dados. Ao final do trabalho foi possível realizar a comparação entre os diferentes métodos e programação e escolher a melhor para o processo de produção.

A evolução ou o desenvolvimento de um sistema passa por experimentos que podem ser realizados diretamente no sistema real ou por meio de modelos que os representem (LAW e KELTON, 1991). Harrel *et al.* (2002) defendem a utilização da simulação em função da capacidade de apoio as tomadas de decisões sem que haja intervenção na ambiente real.

A Figura 16 mostra as alternativas disponíveis para a solução de um problema em um sistema qualquer.

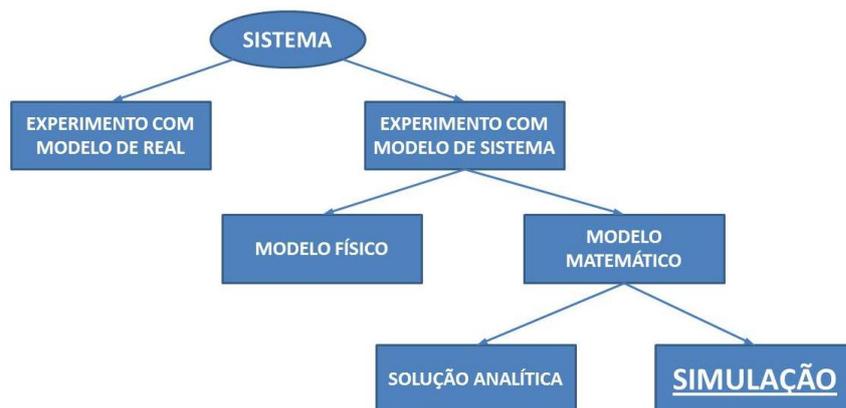


Figura 16: Ramificação dos tipos de experimentos em um sistema.

Fonte: Law e Kelton (1991).

A Figura 16 apresenta as ferramentas existentes para a solução de um problema qualquer, na qual é possível notar que inicialmente são apresentadas duas formas de se resolver o problema, por meio de experimentos com

modelos reais ou com modelos de sistemas. Em seguida surgem outras duas possibilidades: modelos físicos ou modelos matemáticos, por último, os modelos matemáticos se dividem em duas partes: soluções analíticas e simulação.

Ao iniciar um trabalho de aplicação de simulação é necessário conhecer os diferentes tipos de simulação e buscar a melhor alternativa para a solução do problema. A Figura 17 mostra os diferentes tipos de simulação por Law e Kelton (1991), na qual o objetivo é encontrar a simulação de eventos discretos.

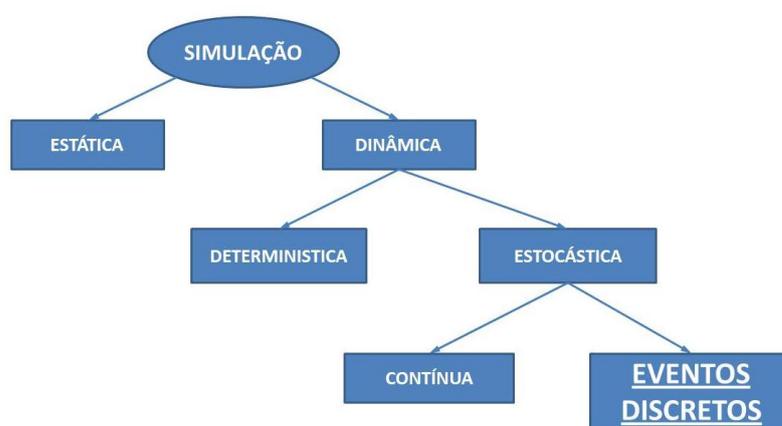


Figura 17: Diferentes tipos de simulação.

Fonte: Law e Kelton (1991).

A Figura 17 apresenta duas diferentes características de simulação: a estática e a dinâmica, na qual suas principais características são que: o modelo de simulação estática não leva em consideração a variável tempo; o modelo de simulação dinâmico atribui em seus modelos a variável tempo (LAW e KELTON, 1991).

Ao se observar uma simulação dinâmica, apresenta-se duas outras variações: o modelo determinístico e o modelo estocástico, que são diferenciadas pela existência ou não das variáveis aleatórias e são detalhadas logo abaixo:

- Modelo determinístico: os modelos determinísticos são caracterizados por não conter variáveis aleatórias, ou seja, os dados de entrada como: tempo de processo, tempo de atendimento ou tempo entre as chegadas, são valores médios que não variam entre um evento e outro (FREITAS, 2001);

- Modelo estocástico: ao contrário dos modelos determinísticos, os estocásticos possuem valores que respeitam uma distribuição estatística ou aleatória que é configurada visando deixar o modelo de simulação o mais parecido possível com o sistema real (FREITAS, 2001).

Dentre as variações existentes nos modelos estocásticos estão os modelos de simulação contínua e de eventos, ou eventos discretos, que se caracterizam por:

- Modelo contínuo: no modelo de simulação contínua as variáveis de estado mudam ao longo do tempo de simulação. Como exemplo, é possível imaginar a alteração de temperatura de um corpo à exposição do calor por um período de tempo. Esta variação pode ser observada na Figura 18.

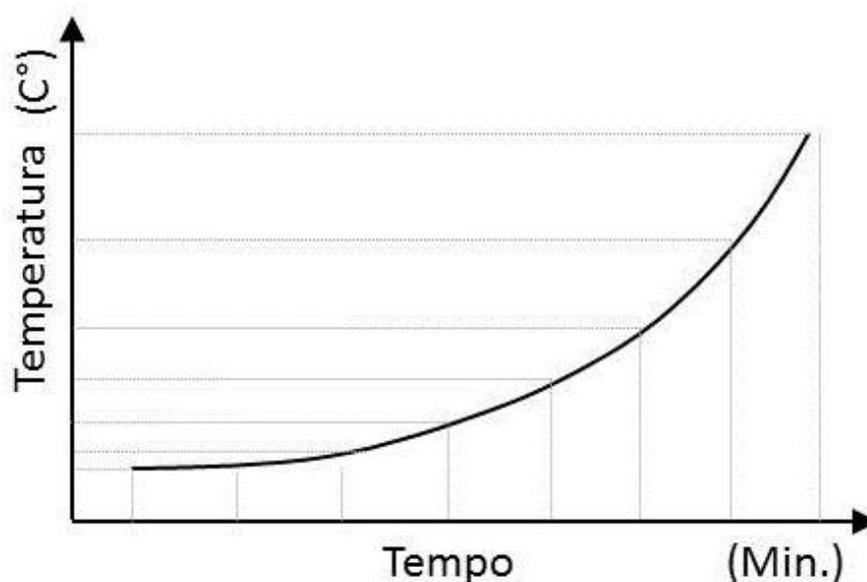


Figura 18: Exemplo de modelo contínuo.

Fonte: Próprio autor.

- Modelo eventos discretos: a principal característica de um modelo de simulação por eventos discretos é que as variáveis de estado se mantêm estáticas por um determinado tempo e podem ser modificadas após a ocorrência de um evento. Este modelo pode ser exemplificado por meio da quantidade de peças existentes em um estoque ao longo de um período, à medida que os lotes são movidos para este estoque sua a quantidade de peças aumenta a Figura 19 ilustra este exemplo.

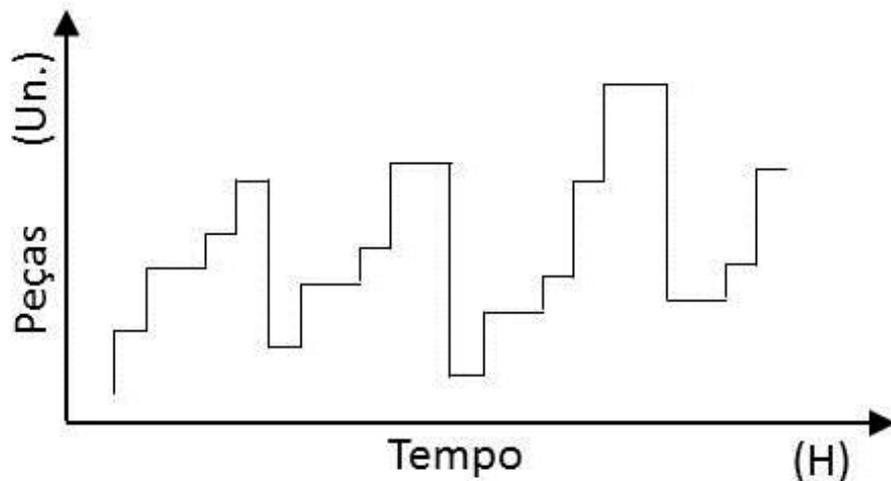


Figura 19: Exemplo de modelo de eventos discretos.

Fonte: Próprio autor.

Este trabalho se restringe apenas a estudar a simulação de eventos discretos, que é definido por Freitas (2001) como sendo um conjunto de acontecimentos que quando ocorrem provoca mudanças no sistema e todas as mudanças do sistema ocorrem somente com a ocorrência de um evento. Eventos podem ser, por exemplo: a chegada de uma peça ou pessoa ao sistema; o início de um atendimento ou processamento; a saída de uma entidade do sistema.

Harrel *et al.* (2002) definem eventos discretos como sendo uma ação instantânea que ocorre em um momento único. Para Banks (1998), a simulação de eventos é composta por entidades que podem ser pessoas, peças ou equipamentos, e quando alguma entidade executa ações, estas causam efeitos no sistema.

Segundo Law e Kelton (1991), a simulação de eventos discretos consiste em um modelo que evolui ao longo do tempo por uma representação em que as variáveis do estado mudam instantaneamente as ações ocorridas.

Dentre os softwares desenvolvidos para a simulação de eventos discretos, destacam-se o Arena, ProModel e o Plant Simulation.

Para evidenciar a importância da utilização da simulação de eventos discretos na academia, serão citados alguns trabalhos nos quais este tema foi abordado.

Andrew (2005) aplicou a simulação de eventos discretos para ajudar a tomada de decisão em uma empresa de recipientes para gás, com o objetivo de ajudar a gerência a conhecer melhor as variáveis existentes no sistema de manufatura.

Gurumurthy e Kodali (2011) utilizaram a simulação de eventos discretos para a criação de novos cenários aplicando as ferramentas da manufatura enxuta em uma empresa de portas e janelas. Ao final do trabalho os resultados foram satisfatórios, pois permitiram o aumento de produtividade e eficiência do processo de manufatura.

Dhouib, Ghardi e Landousi (2010) trabalharam com simulação de eventos discretos em um estudo de caso, no qual o objetivo era propor um modelo de flexibilização em uma empresa com características de produção por lotes e com alta variedade de produtos, com o agravante de alta incidência de falhas nos equipamentos e grandes variações de demanda. A solução que respondeu a questão fundamental deste trabalho foi a aplicação de técnicas que tornaram a produção contínua ao invés da produção intermitente, que havia no cenário inicial.

Para que o trabalho de simulação de eventos discretos possa contribuir com a solução de problemas encontrados em quaisquer sistemas é necessário que seu desenvolvimento respeite alguns passos básicos. Law e Kelton (1991) desenvolveram um fluxograma com as etapas de um projeto de simulação, conforme Figura 20.

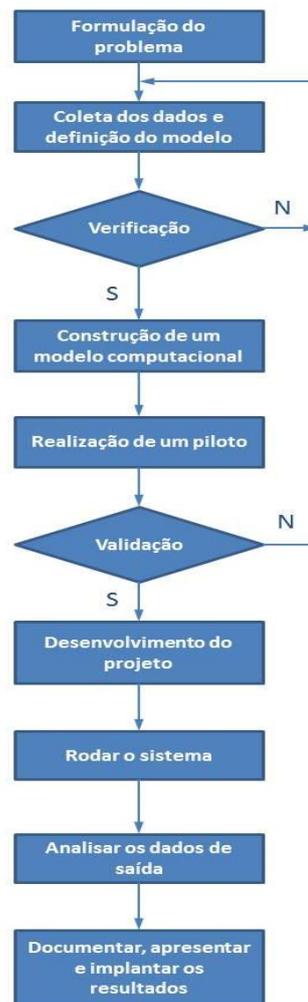


Figura 20: Fluxograma de atividades em um projeto de simulação.

Fonte: Law e Kelton (1991).

A Figura 20 apresenta um fluxograma com as atividades a serem executadas em um trabalho de simulação. Neste modelo, a primeira atividade é formular e entender qual é o problema existente, em seguida são coletados os dados e definido o modelo digital em um *software* de simulação, ao final desta etapa destaca-se a verificação do modelo definido. Isto é feito por meio da adição de contadores e indicadores que são usados para certificar que a lógica aplicada está condizente com a realidade.

Após a verificação, o próximo passo é a construção do modelo que represente o sistema de produção, a realização de um piloto e a validação deste modelo por meio de comparações entre os resultados encontrados na simulação com dados reais do sistema.

Com o modelo validado, ou seja, o sistema virtual representando o sistema real inicia-se o trabalho de criação dos cenários futuros, roda-se o modelo e coletam-se os dados necessários para a tomada de decisão.

Para Banks (1998), os passos de um trabalho de simulação devem respeitar o fluxograma da Figura 21. Harrel *et al.* (2002) e Freitas (2001) também aplicam este mesmo modelo em suas obras.

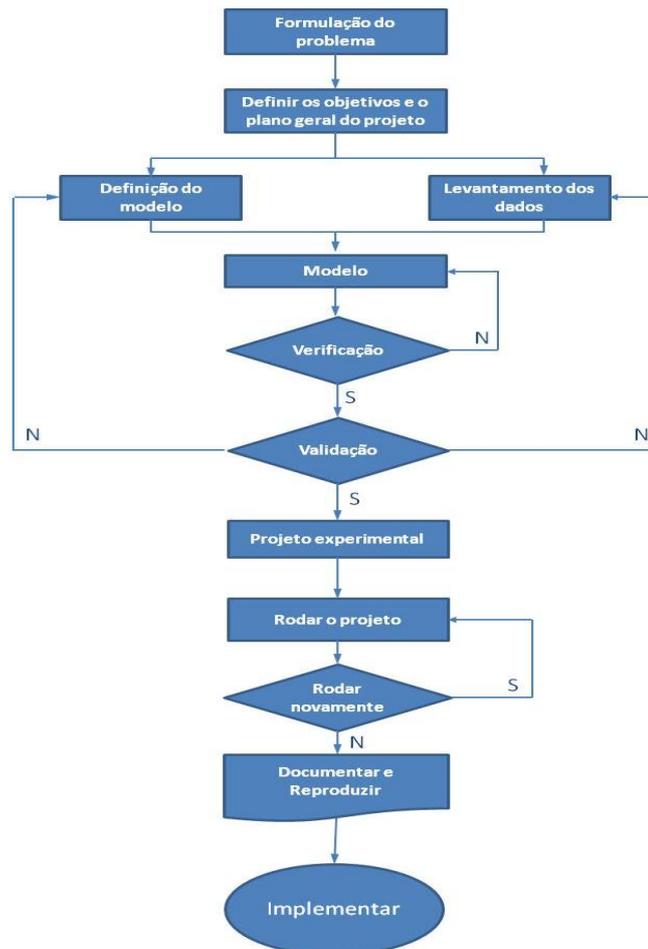


Figura 21: Fluxograma de atividades em um projeto de simulação.

Fonte: Banks (1998)

O modelo apresentado por Banks (1998) é similar ao apresentado por Law e Kelton (1991) com as seguintes diferenças: (1) o levantamento dos dados e a definição do modelo são executados em paralelo; (2) a verificação e a validação são realizadas em sequência; (3) a existência de um *loop* para o caso de ser necessário rodar o modelo novamente.

Como podem ser observados nos dois fluxogramas apresentados nas Figura 20 e Figura 21, ambos possuem as atividades de verificação e validação. Para Freitas (2001) a existência destas duas atividades é para garantir a qualidade do modelo. Harrel *et al.* (2002) afirmaram que um modelo de simulação não é confiável e não deve ser utilizado caso não tenha sido verificado e validado.

A verificação é aplicada para garantir que o modelo respeite a lógica proposta no estudo e pode ser realizada por meio da animação do modelo. Esta animação consiste em analisar passo a passo se os caminhos de entradas e saídas condizem com o projetado. Outra forma de se verificar o modelo é a colocação de controladores ou contadores ao longo do caminho das entidades (HARREL *et al.* 2002). Para Freitas (2001), a verificação consiste em garantir que as simplificações e os pressupostos projetados no modelo foram corretamente utilizados no modelo.

A validação consiste em saber se mesmo com as simplificações e pressupostos, o modelo ainda representa o sistema real (FREITAS, 2001). Para Harrel *et al.* (2002) a comparação de um histórico de fabricação pode ser usados para validar um modelo, desta forma, os dados obtidos na simulação devem ser semelhantes ao histórico. É prudente realizar este procedimento mais de uma vez, aumentando com isso a credibilidade do modelo.

Dentre as ferramentas existentes nos *softwares* de simulação, a otimização talvez seja a de maior relevância. Segundo Banks (1998), aplicar esta ferramenta em um modelo de simulação consiste em definir as variáveis do sistema que devem ser dimensionadas e definir o objetivo final do estudo. Depois disso, o software utilizam seus algoritmos para simular várias vezes o mesmo cenário com valores das variáveis diferentes, fornecendo assim, informações para a escolha da melhor situação.

A Figura 22 demonstra o ciclo criado entre o modelo de simulação com os algoritmos de otimização, passando pelas variáveis definidas e pelos resultados encontrados cada vez que se roda a otimização.

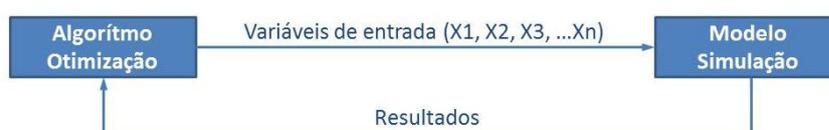


Figura 22: Esquema simplificado da otimização.

Fonte: Harrel *et al.* (2002).

Harrel *et al.* (2002) afirmam que o caminho mais seguro para encontrar a solução ótima de um sistema por meio da otimização de um modelo de simulação é:

1. identificar todas as variáveis de decisão que causam variações ao sistema;
2. identificar todas as possíveis soluções, com base nos possíveis valores das variáveis;
3. avaliar todas estas soluções corretamente;
4. comparar todas as soluções simuladas;
5. registrar e implementar a melhor resposta.

A otimização de sistemas de produção é uma prática que vem sendo utilizada para auxiliar as tomadas de decisões, isso se deve ao fato do *software* definir o melhor valor para as variáveis do sistema. A seguir estão alguns exemplos de trabalhos que utilizaram a ferramenta da otimização, que tiveram suas capacidades otimizadas reduzindo o estoque existente no processo.

Filip *et al.* (2012) desenvolveram um estudo de caso utilizando a simulação para identificar e implementar métodos mais econômicos com a otimização de fluxo de produção em uma linha de montagem. As metas econômicas deste trabalho foram alcançadas mediante a introdução e o dimensionamento de *buffers* durante o sistema de produção.

Zang, Chiang e Wu (2013) utilizaram a simulação de eventos discretos para representar um sistema de produção com três pontos principais: o tempo de produção, a quantidade de refugo e o tempo de reparo dos equipamentos pela manutenção. Estes três pontos compõem o custo fixo e o custo variável de um produto. Neste trabalho foi utilizada a otimização para determinar as melhores alternativas pensando em um custo médio entre o fixo e o variável.

Melouk *et al.* (2013) utilizaram a simulação de eventos discretos para mapear o sistema de produção de aço e as variáveis que podem influenciar no custo final do produto. Estas variáveis foram colocadas em um modelo de otimização que apontava melhorias no sistema do ponto de vista do custo. Esta ferramenta se tornou base para as tomadas de decisões da empresa e foi considerado eficiente para este fim.

Um bom modelo de simulação e conseqüentemente as ferramentas de otimização dependem de sua aderência com o sistema real. Esta aderência está diretamente relacionada com os dados que são coletados e colocados no modelo (BANKS, 1998; LAW e KELTON, 1991).

Para compreender melhor as informações que são coletadas é importante que o profissional responsável pelo desenvolvimento do modelo de simulação conheça a teoria das filas, que é responsável por explicar as diferentes formas de chegadas e atendimentos, e conheça também as distribuições de probabilidades estatísticas, que ajudará a tratar as informações coletadas direcionando-as para a distribuição que melhor representa a realidade.

Neste trabalho os dados inseridos em um modelo de simulação serão submetidos a análises de modelagem estatística, isto será feito com o objetivo de aproximar ao máximo os resultados obtidos na simulação com o histórico de informações do sistema de produção. Para isso, é necessário abordar os diferentes tipos de distribuições utilizadas na simulação.

2.5. MODELAGEM DOS DADOS

Neste trabalho, espera-se que o modelo desenvolvido possa contribuir para a construção de sistemas de simulação que representem da melhor maneira possível os sistemas reais, para isso, serão tratados os dados utilizados na modelagem utilizando técnicas de distribuição de probabilidade estatística.

A seguir estão descritas as principais distribuições estatísticas utilizadas na simulação.

2.5.1. DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DISCRETA

Segundo Magalhães (2004), o modelo uniforme discreto modela dados de uma situação, na qual, todos os valores reais contidos em um intervalo tem a mesma probabilidade de serem escolhidos. Esta função é representada pela Equação (8):

$$p(x_i) = 1/k ; \text{ para } i = 1,2,\dots,k. \quad (8)$$

2.5.2. DISTRIBUIÇÃO UNIFORME CONTÍNUA

Segundo Magalhães (2004), quando X (valores medidos) seguir o modelo de distribuição uniforme contínua dentro do intervalo $[a,b] \subset R$, e se todos os

subintervalos de $[a,b]$ com o mesmo comprimento também tiverem a mesma probabilidade de acontecer, a função densidade está demonstrada na equação (9):

$$f(x) = \frac{1}{b-a} I_{[a,b]}(x) \quad (9)$$

2.5.3. DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição normal, também chamada de distribuição *Gaussiana* representa um papel central na estatística, além disso, em condições moderadas, a distribuição normal pode ser utilizada para aproximar uma grande variedade de distribuições em grandes amostras.

A média (μ) e a variância (σ^2) são os parâmetros populacionais da distribuição normal expressos pela equação (10):

$$f(x/\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}, -\infty < x < \infty. \quad (10)$$

A Figura 23 ilustra graficamente uma distribuição normal.

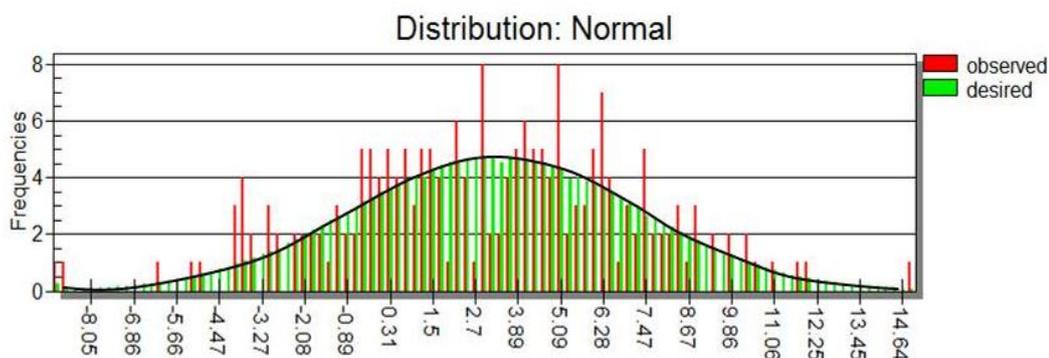


Figura 23: Distribuição normal em modelo gráfico.

Fonte: Próprio autor.

2.5.4. DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL

Casella e Berger (2011) afirmaram que se X (valores medidos) é uma variável aleatória cujo logaritmo é normalmente distribuído (isto é, $\log X \sim n(\mu, \sigma^2)$), então X tem uma distribuição lognormal e sua função densidade probabilidade é definida pela equação (11):

$$f(x/\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{1}{x} e^{-(\log x - \mu)^2 / (2\sigma^2)}, 0 < x < \infty, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0. \quad (11)$$

A Figura 24 ilustra a distribuição Lognormal.

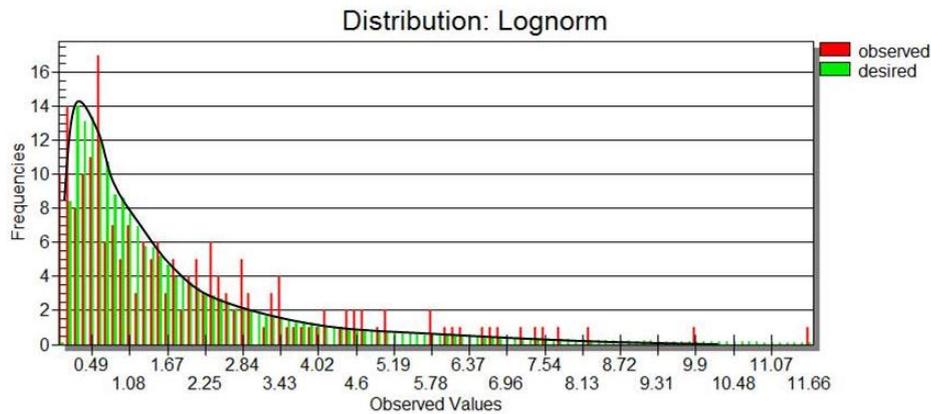


Figura 24: Distribuição lognormal em modelo gráfico.

Fonte: Próprio autor.

2.5.5. DISTRIBUIÇÃO GEOMÉTRICA

Considerada por Casella e Berger (2011) como sendo uma das mais simples distribuições para modelar tempo de espera, a geométrica é utilizada muitas vezes para definir o momento de espera para determinado acontecimento. Na prática, esta distribuição pode ser utilizada para determinar o momento da ocorrência de uma falha, por exemplo. Sua função probabilidade é definida na equação (12):

$$P\left(X = \frac{x}{p}\right) = p(1 - p)^{x-1}, x = 1, 2, \dots, \quad (12)$$

2.5.6. DISTRIBUIÇÃO HIPERGEOMÉTRICA

Segundo Bussab e Morettin (2010), a distribuição hipergeométrica é utilizada quando ocorrem extrações casuais feitas sem reposição de uma população dividida em dois grupos. Os autores exemplificam esta distribuição considerando uma população de N objetos, r dos quais tem atributos A e $N - r$ tem atributo B. Um grupo de n elementos é escolhido ao acaso, sem reposição. A equação (13) é utilizada para calcular a probabilidade que este grupo contenha k elementos com atributos A.

$$p_k = \frac{\binom{r}{k} \binom{N-r}{n-k}}{\binom{N}{n}} \quad (13)$$

Sendo que: $\max(0, n - N + r) \leq k \leq \min(r, n)$.

2.5.7. DISTRIBUIÇÃO BINOMIAL

Segundo Bussab e Morettin (2010), a distribuição binomial modela dados que possuem apenas dois resultados (ensaio de Bernoulli), como por exemplo, verdadeiro ou falso; aprovado ou reprovado, onde uma resposta não interfere no próximo resultado. Supondo que o ensaio de Bernoulli seja repedido cinco (5) vezes ($n=5$), um particular resultado pode ser obtido FVVFV ou a quintupla ordenada (0, 1, 1, 0, 1). A expressão apresentada na equação (13) é utilizada para identificar a probabilidade deste resultado se repetir novamente.

$$(1-p)pp(1-p)p = p^3(1-p)^2 \quad (13)$$

2.5.8. DISTRIBUIÇÃO POISSON

Segundo Casella e Berger (2011) a distribuição de Poisson é aplicada em eventos que devem acontecer de forma aleatória, como a chegada de clientes em um banco. O único parâmetro desta distribuição é λ .

A densidade de probabilidade de uma Poisson, assumindo uma variável aleatória X , é dada pela equação (14):

$$P\left(X = \frac{x}{\lambda}\right) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, x = 0, 1, \dots \quad (14)$$

A Figura 25 ilustra a forma gráfica da Poisson.

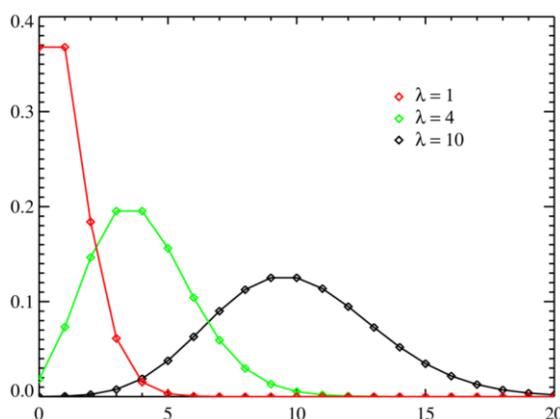


Figura 25: Forma gráfica da Poisson.

2.5.9. DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL NEGATIVA

Segundo Prado (2003) a distribuição de probabilidade exponencial negativa é correspondente a Poisson, porém quando se refere a intervalos de chegada. A equação (15) representa a exponencial negativa:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (15)$$

Onde: $f(x)$ é a função densidade, sendo λ o ritmo de chegada e x o tempo.

A Figura 26 apresenta a forma gráfica da exponencial negativa.

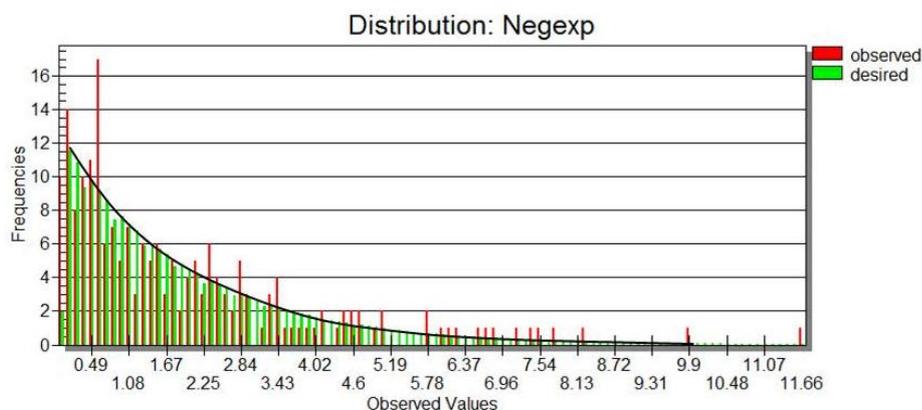


Figura 26: Distribuição exponencial negativa.

Fonte: Próprio autor.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O objetivo desta dissertação é propor um método para melhoria de sistema de produção que integre a simulação de eventos discretos com as ferramentas da manufatura enxuta. Desta forma, fez-se necessário seguir as etapas descritas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

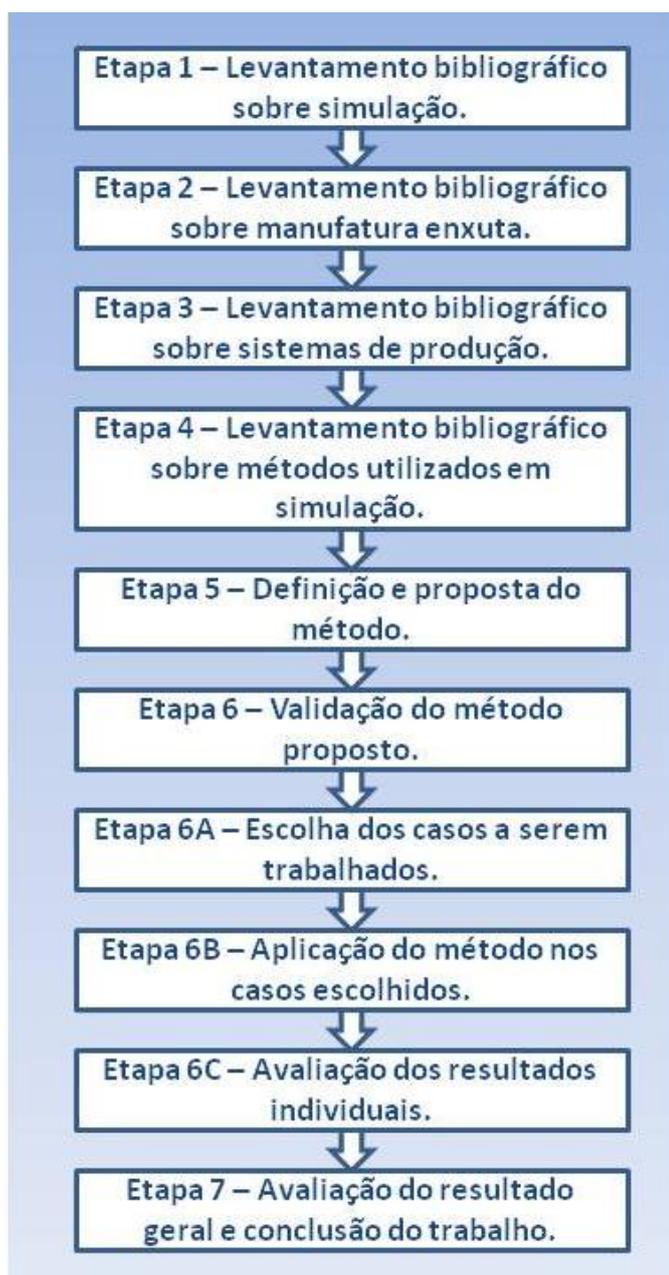


Figura 27: Etapas da metodologia da dissertação.

A Figura 27 ilustra as etapas necessárias para atingir o objetivo proposto nesta dissertação, abaixo está a explicação de cada uma das etapas e sua importância para o trabalho:

Nas etapas 1, 2 e 3 foram realizados um levantamento bibliográfico com artigos, dissertações, teses e livros, em sua maioria dos últimos cinco anos, referentes ao tema simulação e simulação de eventos discretos, sistemas de produção e manufatura enxuta. Desta forma foi possível conhecer e aprofundar os conceitos, sobre a história e aplicações referentes aos temas.

Desta forma foi possível identificar os principais trabalhos e autores, em especial sobre o tema de simulação em sistemas de produção, sobre as seguintes óticas:

- ganhos proporcionados por meio da utilização da simulação;
- os métodos utilizados para a o desenvolvimento de trabalhos integrando manufatura enxuta e simulação;
- os métodos utilizados para o modelamento dos sistemas de produção;
- as dificuldades dos autores em representar os sistemas de produção em modelos de simulação.

Na etapa 4 foi realizado um levantamento bibliográfico em livros e artigos básicos de simulação e modelamento de sistemas com o intuito de conhecer as principais características dos métodos mais utilizados para a criação de modelos de simulação.

A etapa 5 foi utilizada para identificar as oportunidades de melhoria dos métodos já utilizados, baseando-se nas observações feitas nas etapas 1, 2 e 3 desta metodologia de trabalho, além de escrever um método de aplicação dos conceitos da manufatura enxuta e da simulação para melhoria de sistemas de produção.

Para a aprovação de um novo método, faz-se necessário a validação deste método. Baseando-se nos conceitos da modelagem e simulação como metodologia de pesquisa que foi definida por Miguel *et al.* (2012) na qual, esta é uma pesquisa quantitativa baseada em modelos matemáticos utilizada para a resolução de problemas, são indicados como etapas desta metodologia a: definição do problema; construção no modelo; solução do modelo; validação do modelo e implantação da solução.

Desta forma, na etapa 6A foram escolhidos, por conveniência, quatro casos com as características de:

- ser um sistema de produção;
- ter a possibilidade de construção de um VSM;
- possuir dados suficientes para a geração de um modelo de simulação;
- ter a possibilidade de geração de novos cenários;

Seguindo estas características o método proposto foi aplicado nos quatro casos abaixo:

- caso 1 - Redução de WIP;
- caso 2 - Aquisição de novos equipamentos;
- caso 3 - Justificativa de investimento para nova tecnologia de corte;
- caso 4 - Criação de novos cenários para melhoria do sistema de produção.

A etapa 6C trata-se da análise individual de cada um dos casos estudados, nesta etapa foram avaliados os resultados referentes à: aderência entre o sistema real e o virtual utilizando as ferramentas estatísticas; evolução do sistema de produção após a aplicação das ferramentas da manufatura enxuta.

Com todas as informações e resultados dos casos individuais, a etapa 7 foi utilizada para a concluir se o método foi eficaz para estas casos e se este pode ser aplicado em outros casos com as mesmas características.

4. O MÉTODO PROPOSTO

Este capítulo destina-se a apresentar o método no qual o objetivo é orientar e contribuir com trabalhos de simulação de eventos discretos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** demonstra o fluxograma com as etapas defendidas nesta dissertação.

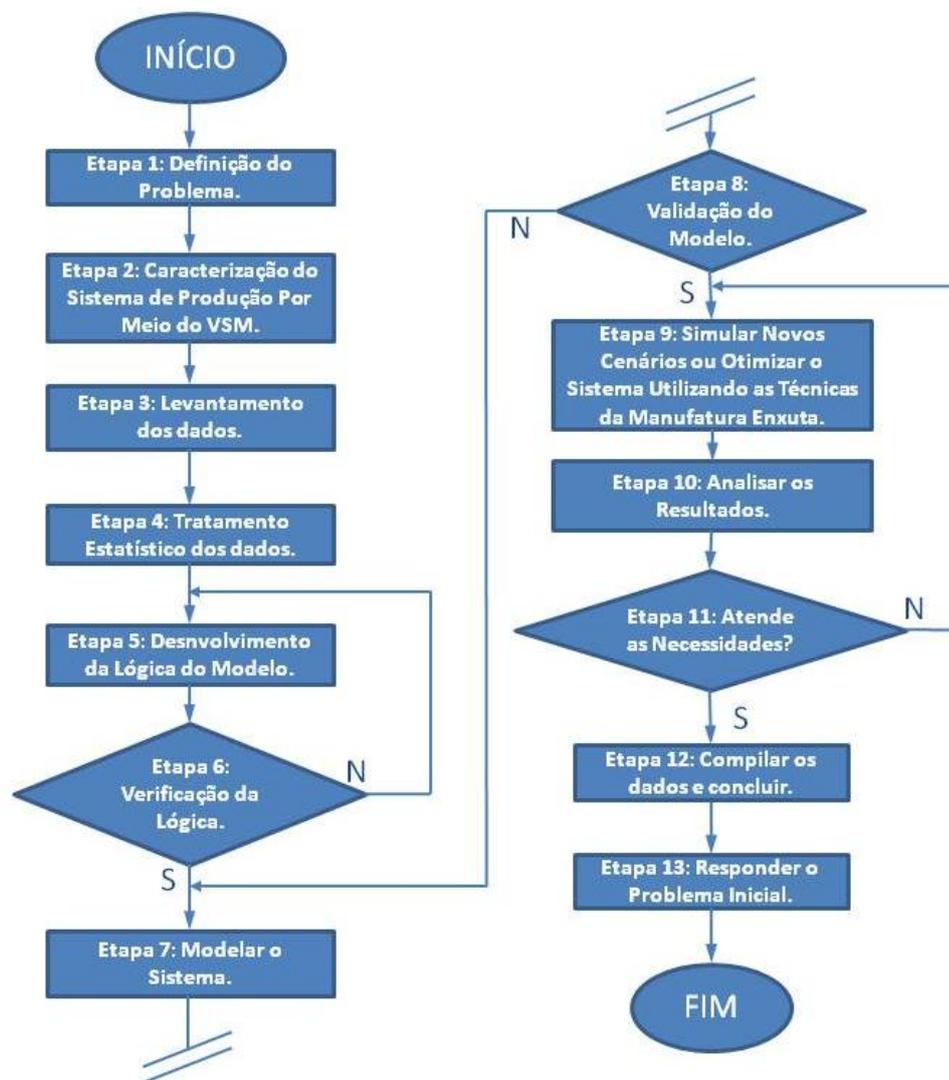


Figura 28: Fluxograma das etapas do modelo proposto.

O método proposto conta com treze etapas que estão explicadas a seguir:

A etapa 1 é destinada a entender e definir corretamente o problema a ser trabalhado no caso. Os softwares de simulação permitem que o modelo digital represente sistema real, quando o problema não está bem especificado é comum desenvolver modelos com características diferentes do objetivo real do caso;

A etapa 2 é destinada à caracterização do sistema de produção, possibilitando compreender questões que nem sempre fazem parte do seu dia-a-dia, como por exemplo: conhecer o arranjo físico, como:

- o modelo do processo de manufatura;
- as características da programação da produção;
- a estratégia de movimentação dos produtos;
- o fluxo de informações do sistema;
- a construção de um VSM que compile todas estas informações.

O levantamento dos dados é a terceira etapa do método, este é o momento de maior contato com o sistema de produção, pois serão coletadas informações referentes à:

- tempo de processamento das fases de construção do produto;
- tempo de *setup*;
- histórico de falhas e quebra dos equipamentos;
- índice de refugo;
- frequências de ajustes e medições dos equipamentos ou peças;
- forma de entrada e saída do produto na estação de trabalho;
- fluxo do produto;
- rotina dos operadores;
- *layout* do ambiente de;
- Locais e capacidades dos estoques;

A etapa 4 é o tratamento estatístico dos dados com o objetivo de conhecer a distribuição de probabilidade dos dados coletados. Esta etapa é considerada importante para o método, pois os resultados obtidos nesta etapa irá alimentar o modelo de simulação. Desta forma, as informações de tempo utilizadas no modelo de simulação terão as mesmas características do sistema real.

A etapa 5 consiste em desenvolver a lógica de programação do modelo de simulação, neste momento é importante que se defina:

- as ferramentas do software que ira representar cada fase de operação;
- os tipos e características das peças que irão ser utilizados no modelo;
- a maneira que as peças irão se movimentar entre as estações de trabalho, se serão lotes, individuais, em caixas etc...;
- se é importante para o modelo conter ações de operadores ou considerar apenas a operação dos equipamentos;
- o caminho das peças entre as operações de trabalho, se as peças estão se movendo para o caminho correto e nos momentos certos.

Por se tratar de uma etapa conceitual do modelamento, é aconselhável que a ideia do modelo seja definida em anotações feitas em papel. Além disso, é importante que seja criado apenas uma parte do modelo e em caso de aprovação dá-se continuidade no modelamento.

A etapa 6 é a verificação da lógica desenvolvida na etapa anterior e pode ser realizado de algumas formas, são elas:

- utilizando contadores ao longo do processo de simulação no qual é possível verificar o caminho em que as peças estão percorrendo e se a quantidade de peças no processo condiz com a realidade;
- utilizando gráficas que demonstrem as atividades dos equipamentos e ferramentas do modelo;
- rodando o modelo em velocidade baixa para que seja possível visualizar o caminho das peças ao longo do modelo.

Por se tratar de uma etapa de aprovação, deve-se passar para a próxima etapa somente quando a lógica estiver aprovada.

Com a lógica do modelo verificada, a próximo passo é a etapa 7 do método que consiste em criar o modelamento do sistema completo, atentando-se a todas as características que contribuam para responder o problema levantado na etapa 1.

A etapa 8 é a validação do modelo de simulação, isso deve ser feito comparando o sistema real com o simulado, no qual, o objeto de comparação deve ser alguma informação importante ao sistema. Um exemplo de validação é a comparação da quantidade de peças produzidas ao longo de um período. Estatisticamente, deve-se realizar esta comparação mais de uma vez. A Tabela 1 ilustra um exemplo de validação de um modelo de simulação.

Tabela 1: Exemplo de validação de um modelo de simulação.

	Produção Real (caixas)	Produção Virtual (caixas)	Aderência (%)
1º Dia	3.272	3.180	97,2
2º Dia	3.353	3.402	98,5
3º Dia	3.679	3.618	98,3
4º Dia	2.723	2.815	96,7
5º Dia	2.918	3.014	96,8
TOTAL	15.945	16.029	99,5

É importante notar que quanto maior a aderência entre o sistema real e o simulado, mais confiável é o modelo de simulação.

Com o modelo validado, a etapa 9 do método é utilizada para criar novos cenários utilizando os conceitos da manufatura enxuta, seja eles por meio de modificações pontuais no modelo ou por ferramentas específicas de otimização existentes nos softwares. Desta forma é possível simular:

- novos *layouts*;
- adição, remoção ou troca de algum equipamento no processo;
- troca do sistema de produção de empurrado por puxado;
- modificação das rotinas dos operadores;
- o aumento da disponibilidade dos equipamentos;
- diferentes tamanhos de lotes;
- a implantação do sistema *kanban* na rotina da fábrica;

- a modificação do arranjo físico do sistema; entre outras atividades

A etapa 10 consiste em utilizar gráficos, contadores e indicadores para avaliar as modificações realizadas no sistema de produção. Supondo que esta avaliação seja satisfatória para a evolução do sistema de produção deve-se avançar para a etapa 12, caso contrário um novo cenário deve ser criado.

Após as análises realizadas no cenário tido como aprovado, este modelo sugere que seja compilada todas as informações do projeto, incluindo os cenários não aprovados para o histórico dos modelos desenvolvidos. Feito isso, a etapa 13 consistem em gerar um relatório conclusivo que responda a problema inicial do caso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão tratadas todas as informações referentes aos resultados alcançados nos quatro casos que fazem parte desta dissertação, além disso, estarão presentes as discussões sobre os casos de forma individual.

5.1. CASO 1 – REDUÇÃO DE WIP

O aumento da competitividade somado ao aumento da variedade de produtos e redução do tamanho dos lotes levou uma empresa fabricante de válvulas do interior de São Paulo a reestruturar seu modelo de gestão empresarial com o objetivo de se manter competitiva.

Uma das etapas desta reestruturação foi à redução dos custos de fabricação por meio da aplicação das ferramentas da manufatura enxuta. O objeto deste caso foi dimensionar o *working in process* (WIP), trabalhando para reduzir a quantidade de peças entre os processos de manufatura sem impactar na produtividade do sistema.

A simulação foi utilizada para solucionar as questões deste trabalho, aplicando a ferramenta *experiment manager*¹, aplicada em casos de otimização, permitindo que o *software* determine o WIP ideal, para isso, foram definidas duas variáveis: (1) quantidade de containers no sistema, (2) capacidade dos containers.

A Figura 29 ilustra as etapas do desenvolvimento deste projeto utilizando como base o modelo proposto nesta dissertação.

Modelo Proposto	Etapas do Trabalho
Definição do problema.	Excesso de estoque intermediário.
Caracterização do sistema de produção por meio do VSM.	Modelo de processo de manufatura; Tipo de Arranjo físico.
Levantamento dos dados.	Layout do processo; Tempos de processamento; Fluxo do produto; Histórico de quebras, refugos e medições; Tempos de setup; Criação do VSM atual;

¹ Ferramenta do software *plant simulation* que cria uma matriz com valores das variáveis e simula todas as opções, criando assim a possibilidade de comparar e escolher o melhor caso.

	Forma de movimentação dos itens; Percurso e atividades dos operadores.
Tratamento estatístico dos dados.	Definição das distribuições estatísticas dos eventos do processo.
Desenvolvimento da lógica do modelo.	Definir estratégia de modelagem; Criar a lógica do modelo; Definir as ferramentas a serem utilizadas; Criar modelo simplificado.
Verificação da lógica.	Certificar que o modelo simplificado respeita a lógica definida.
Modelagem do sistema.	Criar o modelo final.
Validação do modelo.	Certificar que o modelo final respeita o sistema real de produção.
Simulação de novos cenários ou otimização do sistema utilizando as técnicas da manufatura enxuta.	Aplicar a ferramenta <i>experiment manager</i> para otimizar a quantidade e a capacidade dos containers no sistema.
Análise dos resultados.	Verificar os gráficos e dados extraídos da simulação ou otimização.
Verificação da necessidade de simular novamente.	Verificação da necessidade de simular novamente.
Compilar os dados e concluir.	Resumir os resultados em um relatório final.
Responder o problema inicial.	Apresentar e finalizar o caso.

FIGURA 29: ETAPAS DO CASO 1.

Baseando-se nas etapas que foram apresentadas para este caso, os resultados alcançados serão tratados logo abaixo:

5.1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Após um conjunto de ações gerenciais que tiveram como objetivo a reestruturação de uma empresa fabricante de válvulas, Figura 30, fez-se necessário o dimensionamento da capacidade dos estoques intermediários durante o processo de fabricação, isso ocorreu devido ao balanceamento das atividades envolvidas no processo e deixou o sistema menos dependente de grande quantidade de peças em estoque.



FIGURA 30: FASES DA REESTRUTURAÇÃO DA EMPRESA ESTUDADA.

Inicialmente havia um total de 21.000 peças ao longo do processo dividido em quatro pontos que podem ser observados no VSM do estado atual Figura 31, o custo unitário é de \$58,65 totalizando \$1.231.650,00 em peças estocadas ao longo do processo. Neste caso, não foram considerados os estoques de matéria prima nem o estoque de produto acabado.

5.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO POR MEIO DO VSM

Para o completo entendimento do sistema de produção, fez-se necessário o desenvolvimento do mapeamento de fluxo de valor (VSM) conforme pode ser visto na Figura 31.

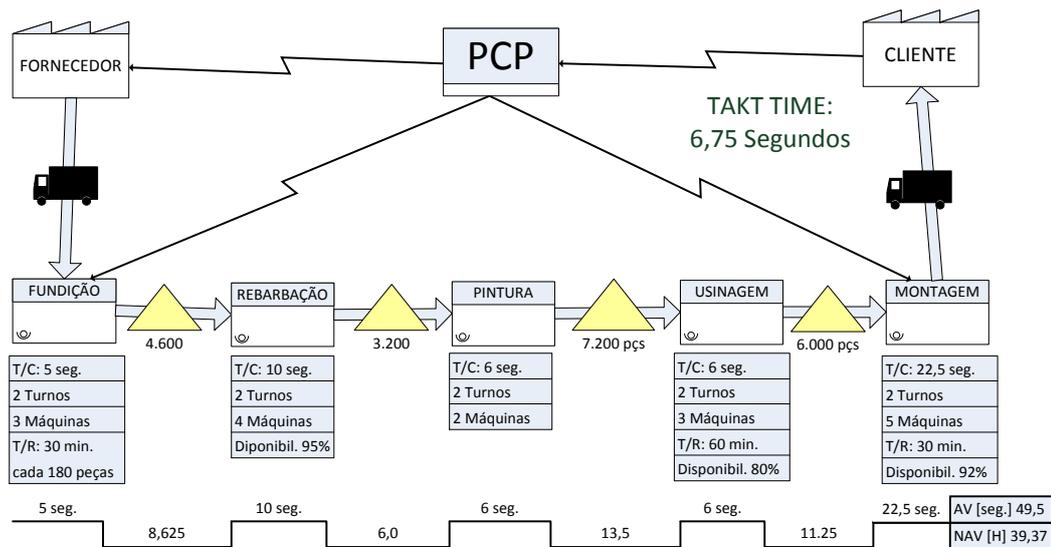


Figura 31: VSM atual

Conforme detalhado no segundo capítulo deste trabalho, este processo pode ser considerado de produção em lotes, apesar de todos os equipamentos estarem configurados para a produção de válvulas, é possível realizar a manufatura de produtos similares. O tipo de arranjo físico é considerado por processo já que os setores de fundição, pintura, usinagem e montagem encontram-se separados como pode ser visto na Figura 32.

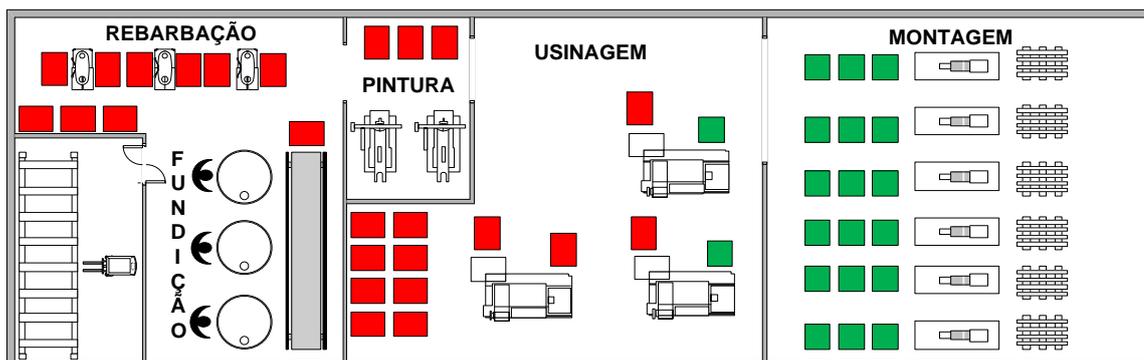


Figura 32: Layout do processo de fabricação de válvulas.

5.1.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS

Para que fosse possível a modelagem do sistema de produção, foi necessário colher informações do processo como: tempo de processo, histórico de quebras, falhas e refugos, tempos de setup, esta informações podem ser vistas na Figura 33. Todas estas informações foram coletadas em visita ao sistema de produção medindo os tempos ou em pesquisas referentes ao histórico dos equipamentos.

	Casqueira	Forno	Rebarbação	Pintura	Usinagem	Montagem
Tempo 1 (S)	4,7	7,80	12,00	10,00	9,00	25,00
Tempo 2 (S)	4,65	7,20	12,50	10,00	9,00	23,00
Tempo 3 (S)	4,775	7,80	12,30	10,00	9,00	24,00
Tempo 4 (S)	4,45	7,60	12,40	10,00	9,00	26,00
Tempo 5 (S)	4,4	7,50	12,80	10,00	9,00	28,00
Tempo 6 (S)	4,15	7,60	11,80	10,00	9,00	23,00
Tempo 7 (S)	4,6	8,10	11,60	10,00	9,00	24,00
Tempo 8 (S)	4,775	8,80	12,70	10,00	9,00	25,00
Tempo 9 (S)	4,75	7,30	13,00	10,00	9,00	25,00
Tempo 10 (S)	4,525	7,90	12,10	10,00	9,00	26,00
Tempo 11 (S)	4,45	9,00	11,60	10,00	9,00	28,00
Tempo 12 (S)	4,4	9,20	11,40	10,00	9,00	27,00
Tempo 13 (S)	4,475	7,10	11,80	10,00	9,00	26,00
Tempo 14 (S)	4,5	7,00	11,90	10,00	9,00	25,00

Tempo 15 (S)	4,525	7,20	11,80	10,00	9,00	24,00
Tempo 16 (S)	4,525	7,10	12,00	10,00	9,00	24,00
Tempo 17 (S)	4,2	7,50	12,10	10,00	9,00	23,00
Tempo 18 (S)	4,475	7,30	11,90	10,00	9,00	28,00
Tempo 19 (S)	4,375	8,10	11,90	10,00	9,00	26,00
Tempo 20 (S)	4,6	8,40	14,00	10,00	9,00	25,00
Tempo 21 (S)	4,55	9,80	12,00	10,00	9,00	24,00
Tempo 22 (S)	4,475	9,10	11,70	10,00	9,00	23,00
Tempo 23 (S)	4,5	7,40	12,30	10,00	9,00	25,00
Tempo 24 (S)	4,375	7,80	12,40	10,00	9,00	28,00
Tempo 25 (S)	4,5	7,80	12,10	10,00	9,00	24,00
Tempo 26 (S)	4,8	7,20	11,90	10,00	9,00	28,00
Tempo 27 (S)	4,775	7,80	11,70	10,00	9,00	24,00
Tempo 28 (S)	4,6	8,30	11,80	10,00	9,00	23,00
Tempo 29 (S)	4,5	8,10	11,50	10,00	9,00	25,00
Tempo 30 (S)	4,675	9,50	12,50	10,00	9,00	25,00
Media (S)	4,535	7,94	12,12	N/A	N/A	25,13
Desvio padrão (S)	0,160	0,763	0,527	N/A	N/A	1,655
Disponibilidade do equipamento (%)	98%	95%	89%	92%	Maq.1 70%, Maq. 2e3 65%	85%
Setup (min.)	50 a 80	30 (180 pçs)	N/A	30 (4000 pçs)	180 a 240	10 a 15
Refugo (%)	2%	0,50%	N/A	N/A	0,32%	0,10%

FIGURA 33: DADOS COLETADOS DO PROCESSO.

5.1.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Após os dados serem coletados, a próxima etapa do projeto foi o tratamento estatístico. Esta etapa teve como objetivo encontrar a distribuição estatística que representasse a ocorrência dos eventos do processo de fabricação dos produtos nas fases de: casqueira, fornos, rebarbação, pintura, usinagem e montagem.

Após alimentar o software com os dados referente ao tempo de processamento e aplicar a ferramenta *fit*² o resultado foi uma distribuição normal como pode ser observada na Figura 34.

² Ferramenta estatística do software Plant Simulation.

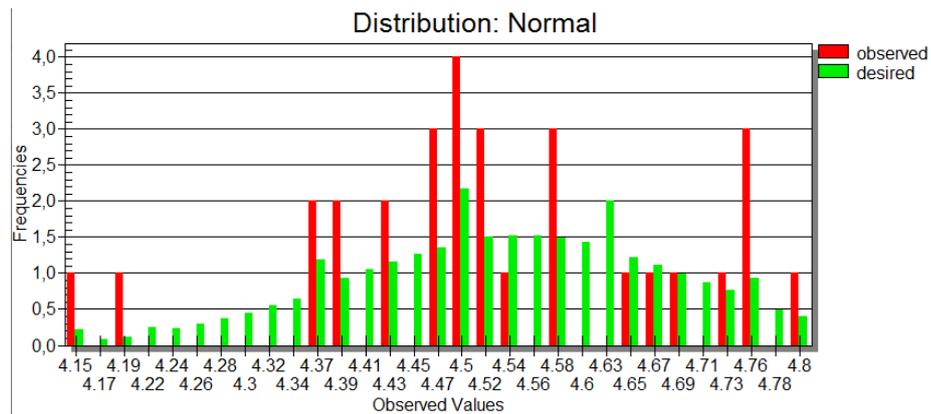


FIGURA 34: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA CASQUEIRA.

O mesmo procedimento foi realizado com as outras fases do processo de fabricação, os resultados podem ser vistos na Figura 35 para o forno, Figura 36 para a rebarbação e Figura 37 para a montagem. Para as demais fases do processo, foram considerados os tempos médios de operação por se tratarem de processos automatizados.

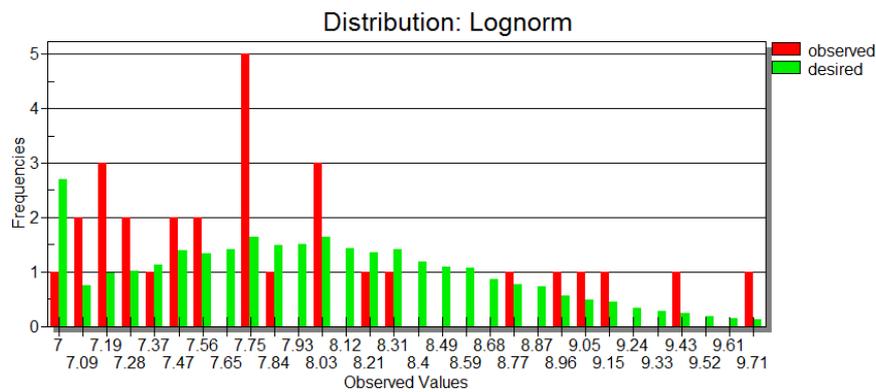


FIGURA 35: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DO FORNO.

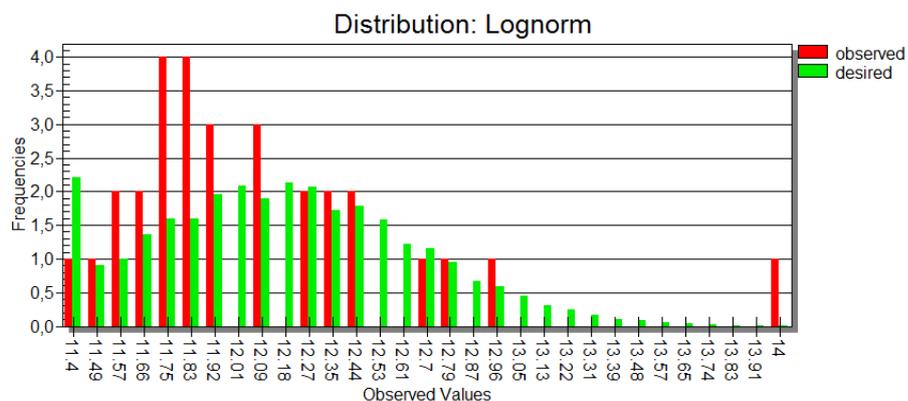


FIGURA 36: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA REBARBAÇÃO.

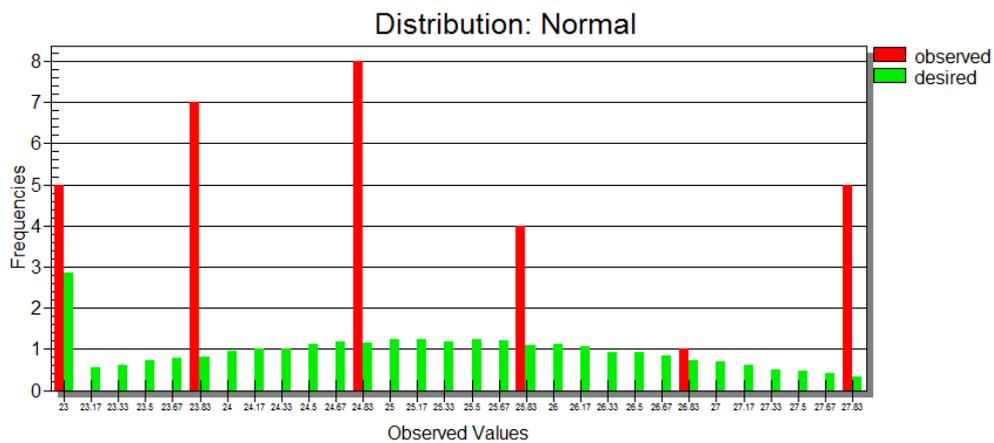


FIGURA 37: DISTRIBUIÇÃO REFERENTE AO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA MONTAGEM.

5.1.5. DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO DA LÓGICA DO MODELO

O desenvolvimento da lógica deste caso foi relativamente simples já que se trata de um fluxo sem variações. A verificação da lógica se deu por meio de medidores e dispositivos que certificaram a lógica de entrada e saída de cada uma das fases do processo no modelo de simulação.

5.1.6. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Após a verificação da lógica do modelo, o próximo passo foi o desenvolvimento completo do modelo, que está ilustrado na Figura 38.

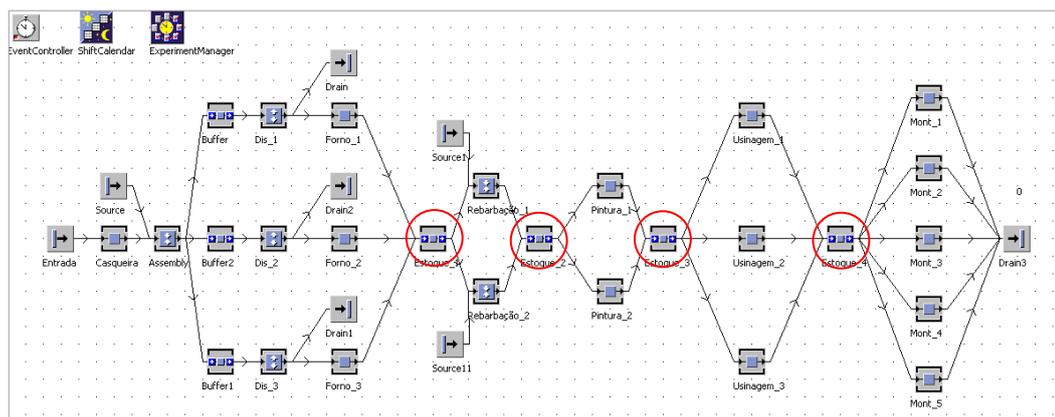


FIGURA 38: MODELO DIGITAL COMPLETO.

O modelo apresentado na Figura 38 demonstra o sistema atual de produção, no qual os círculos em destaque são as representações dos *buffers* (chamado de estoques 1, 2, 3 e 4) estudados no sistema. É possível observar os três

fornos antes do estoque 1, a rebarbação antes do estoque 2, o setor de pintura antes do estoque 3, as máquinas de usinagem antes do estoque 4 e as células de montagem após o estoque 4. Neste modelo está presente a ferramenta *shiftcalendar* que foi utilizada para gerenciar as pausas por: refeições, finais de semanas e trocas de turnos existentes no calendário da empresa.

A validação do modelo se deu por meio do comparativo entre a quantidade de peças fabricadas no sistema real com o virtual por dez dias. A Tabela 2 demonstra a aderência entre os sistemas.

Tabela 2: Comparação entre sistema real e simulado.

	Produção Real (peças)	Produção Virtual (Peças)	Aderência (%)
1º Dia	12.685	12.940	98,0
2º Dia	13.112	12.635	96,3
3º Dia	12.405	13.101	93,3
4º Dia	12.138	12.998	93,4
5º Dia	13.245	12.980	98,0
6º Dia	13.779	12.788	92,3
7º Dia	13.820	13.409	97,0
8º Dia	12.954	12.877	99,9
9º Dia	11.998	12.545	95,6
10º Dia	13.051	12.177	92,8
TOTAL	129.187	128.450	99,4

Ao final de dez dias de produção foram anotadas a quantidade de peças produzidas, este mesmo procedimento foi realizado com o modelo de simulação. Em seguida estes valores foram ordenados na Tabela 2 e analisada a aderência entre os dois sistemas. É possível notar que o menor valor encontrado foi 92,3% e que o total de peças produzidas ao longo destes dez dias teve uma aderência de 99,4% o que foi considerado aprovado para a sequência do trabalho.

5.1.7. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA DA MANUFATURA ENXUTA

O objetivo deste caso é a redução da quantidade de estoque em processo, para isso, foi utilizada a ferramenta *experiment manager*, no qual, os valores de capacidade das quatro estações de *buffer*³ foram definidos em suas extremidades. A condição aprovada neste caso será o valor mínimo de peças em estoque desde que não afetasse a quantidade de peças produzidas ao

³ Nome dado à área destinada ao armazenamento das peças entre os processo de fabricação.

longo de um período. A Tabela 3 demonstra os valores das variáveis inseridas na otimização.

O valor mínimos da Tabela 3 foi considerada igual à quantidade de peças existentes em um contenedor⁴, pois em cada *buffer* poderá ter no mínimo um contenedor. O valor máximo desta mesma tabela é igual ao valor de estoque encontrado no sistema atual de produção.

Tabela 3: Capacidade dos estoques para otimização.

	Estoque 1	Estoque 2	Estoque 3	Estoque 4
Valor Máximo	4600	3200	7200	6000
Valor Mínimo	200	200	200	200
Incremento	200	200	200	200

Ao final do estudo, o *software* gerou o grafico, que pode ser visto na Figura 39, onde estão dispostos a quantidade de peças fabricadas em relação a quantidade de peças existentes nos estoques. Utilizando estas informações, conclui-se que o experimento que continha os valores 800, 600, 600 e 2200 para os estoque 1, 2, 3 e 4 respectivamente apresenta o melhor resultado.



Figura 39: Resultados dos experimentos da otimização.

A Figura 39 apresenta uma parte dos dados obtidos por meio da ferramenta de otimização *experimente manager*. Nesta figura é possível observar os experimentos realizados em um dos eixos e a quantidade de peças produzidas em outro eixo, desta forma é possível observar que em um determinado momento a quantidade de peças existentes nos estoques passa a influenciar na

⁴ Nome dado ao recipient utilizado para transporter as peças ao longo dos processos.

quantidade de peças fabricadas, desta forma considera-se aprovado o experimento que conter a menor quantidade de peças em estoque e que tenha a maior quantidade de peças produzidas.

5.1.8. ANÁLISE E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

Desta forma, a quantidade máxima de WIP ficou definida como 4.200 peças, o custo do estoque intermediário reduziu para \$246.300,00, uma redução de aproximadamente 80% no custo de peças estocadas considerando as 21.000 peças e \$1.231.650,00 do início do projeto.

5.2. CASO 2 – AQUISIÇÃO DE NOVOS EQUIPAMENTOS

A obsolescência tecnológica somada ao aumento da demanda levou uma empresa de rolamentos do interior de São Paulo estudar a aquisição de novos fornos para tratamento térmico.

O cenário atual continha três fornos com características diferentes, são eles: (1) Forno W, (2) Forno A1 e (3) Forno A3. Devido ao alto índice de reparos e por não atender os novos requisitos de qualidade exigidos para os novos produtos, sabe-se que o forno (2) Forno A1 será obsoleto.

O objetivo deste caso foi, por meio da simulação, gerar cenários que demonstrem as filas geradas em três situações, utilizando os equipamentos:

- um Forno W e um Forno A3;
- um Forno W e dois Fornos A3;
- dois Fornos W.

A Figura 40 ilustra as etapas do desenvolvimento deste projeto utilizando como base o modelo proposto nesta dissertação.

Modelo Proposto	Etapas do Trabalho
Definição do problema.	Conhecer as filas geradas pelas alternativas propostas.
Caracterização do sistema de produção por meio do VSM.	N/A
Levantamento dos dados.	Tempos de processamento; Fluxo do produto; Histórico de quebras, refugos e medições;

	Tempos de setup; Forma de movimentação dos itens.
Tratamento estatístico dos dados.	Definição das distribuições estatísticas dos eventos do processo.
Desenvolvimento da lógica do modelo.	Definir estratégia de modelagem; Criar a lógica do modelo; Definir as ferramentas a serem utilizadas; Criar modelo simplificado.
Verificação da lógica.	Certificar que o modelo simplificado respeita a lógica definida.
Modelagem do sistema.	Criar o modelo final.
Validação do modelo.	Certificar que o modelo final respeita o sistema real de produção.
Simulação de novos cenários ou otimização do sistema utilizando as técnicas da manufatura enxuta.	Criar quatro modelos simulando as quatro possibilidades listadas.
Análise dos resultados.	Verificar os gráficos e dados extraídos da simulação ou otimização.
Verificação da necessidade de simular novamente.	N/A
Compilar os dados e concluir.	Resumir os resultados em um relatório final.
Responder o problema inicial.	Apresentar e finalizar o caso.

Figura 40: Etapas do caso 2.

Baseando-se nas etapas que foram apresentadas para este caso, os resultados alcançados serão tratados logo abaixo:

5.2.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O tempo gasto com manutenção com um dos fornos do sistema de tratamento térmico da empresa fez com que a engenharia iniciasse um estudo para a viabilização da aquisição de outro equipamento.

A simulação foi utilizada para o desenvolvimento de três novos cenários: [1] sem o Forno A1 (utilizando apenas os dois que sobraram Forno A3 e Forno W), [2] com mais um forno semelhante ao Forno A3 (sendo 2 Fornos A3 e 1 Forno W) e [3] utilizando 2 Fornos W. O parâmetro utilizado para a tomada de decisão é o tamanho da fila em cada um dos cenários.

5.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO POR MEIO DO VSM

Este sistema de processo pode ser considerado de produção em massa, pois é dimensionado para apenas um processo e possui *setups* relativamente altos e não possui uma variedade muito alta de produtos.

A construção de um VSM não foi necessária, pois se tratava de um sistema relativamente simples para seu entendimento.

5.2.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento dos dados foi realizado por meio de visitas no sistema de produção e reuniões com os especialistas do equipamento. As informações necessárias para o desenvolvimento do modelo de simulação foram:

- família de produtos: 5 famílias W22, W220, W131, W21F e W29;
- capacidade de produção de cada equipamento: 1500 quilogramas por hora (Kg/h) para o Forno W; 400Kg/h para o Forno A1 e Forno A3;
- Tempo de setup: o tempo de *setup* respeita as informações da Figura 41.

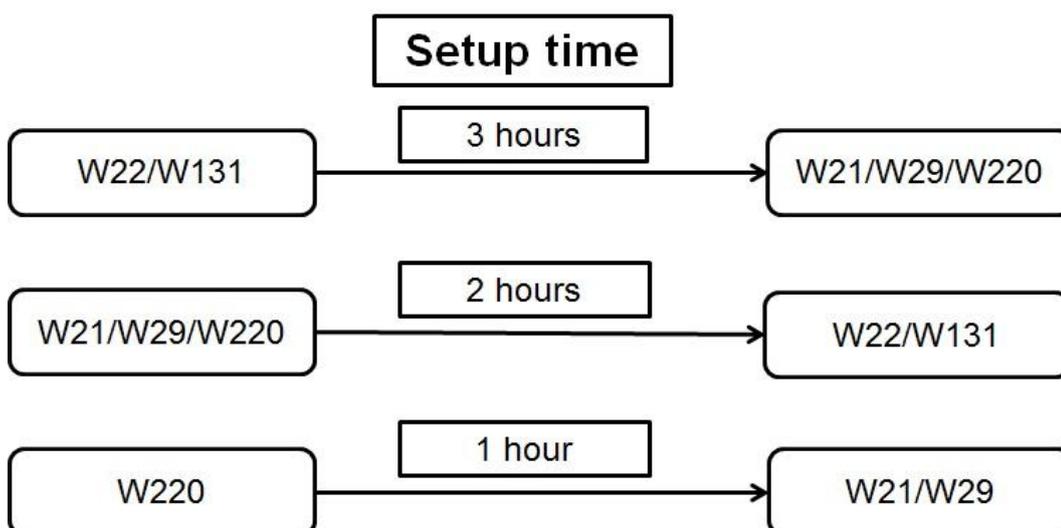


Figura 41: Tempos de setup.

- histórico de 30 dias de produção;
- horários de trabalho: dividido em três turnos, cinco dias por semana com uma hora de refeições para cada turno;
- histórico de falhas e quebras: a disponibilidade do Forno W é de 95,58%; Forno A1 79,68% e o Forno A3 de 90,79%.

5.2.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados obtidos do histórico de trinta (30) dias de produção foram submetidos a testes estatísticos onde os resultados identificaram as distribuições que representaram o sistema real, são elas: (1) O Forno W teve o tempo de processamento modelado para cem (100) peças como uma normal iniciando em 4:15 minutos até 5:00 minutos; (2) Forno A1 e Forno A3 tiveram, nas mesmas condições uma normal iniciando em 8:00 minutos até 8:45 minutos.

5.2.5. DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO DA LÓGICA DO MODELO

A lógica deste caso foi desenvolvida baseando-se no fluxo dos produtos e nas características dos processos, por conta do alto volume de peças a serem tratadas, tornou-se necessário realizar o agrupamento em lotes de cem (100) peças para diminuir o tempo total da simulação. A verificação da lógica se deu por meio de contadores que certificaram que não havia desvio no fluxo do produto e indicavam a quantidade de peças fabricada em cada forno separadamente.

5.2.6. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Após a verificação o modelo final do sistema de produção foi desenvolvido respeitando todas as restrições encontradas na criação da lógica, ao final obteve o modelo ilustrado na Figura 42.

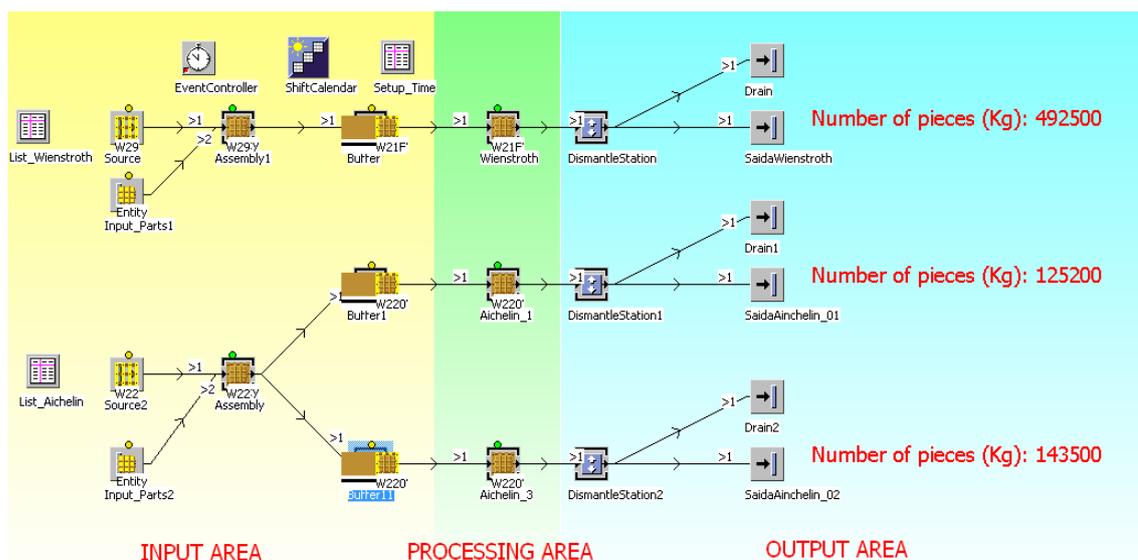


FIGURA 42: ESTADO ATUAL DOS FORNOS.

A validação do modelo se deu por meio da comparação da quantidade de peças fabricadas no período de 30 dias (real) com a quantidade de peças no mesmo período simulada conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4: Tabela comparativa entre produção real e simulada.

Equipamento	Produção real em 30 dias (Kg)	Produção simulada em 30 dias (Kg)	Aderência entre os meios (%)
Forno W	484.889	492.500	98,35
Forno A1	128.282	125.200	97,59
Forno A3	147.991	143.500	96,96

Ao final de trinta dias de produção foram anotadas a quantidade de peças produzidas, este mesmo procedimento foi realizado com o modelo de simulação. Em seguida estes valores foram ordenados na Tabela 2 e analisada a aderência entre os dois sistemas. É possível notar que o menor valor encontrado foi 96,96% e que o maior valor de aderência foi 98,35% o que foi considerado aprovado para a sequência do trabalho.

5.2.7. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA DA MANUFATURA ENXUTA

Este trabalho teve o objetivo de criar três novos cenários baseando-se no cenário atual do sistema de tratamento térmico, a seguir estão às imagens correspondentes a cada um dos novos cenários.

A Figura 43 ilustra o modelo referente ao primeiro cenário desenvolvido. Nesta imagem é possível observar o fluxo do sistema de produção dividido em três partes: entrada de matéria; processamentos e área de saída. As duas linhas contando o Forno W e Forno A3 também são observadas.

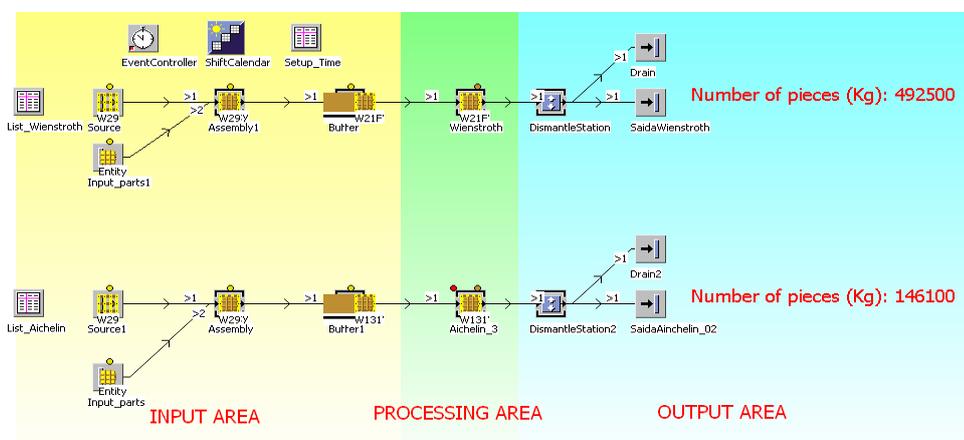


FIGURA 43: PRIMEIRO CENÁRIO FUTURO.

A Figura 44 ilustra o modelo referente ao segundo cenário desenvolvido. Nesta imagem é possível observar o fluxo do sistema de produção dividido em três partes: entrada de matéria; processamentos e área de saída. As três linhas contando o Forno W e dois Forno A3.

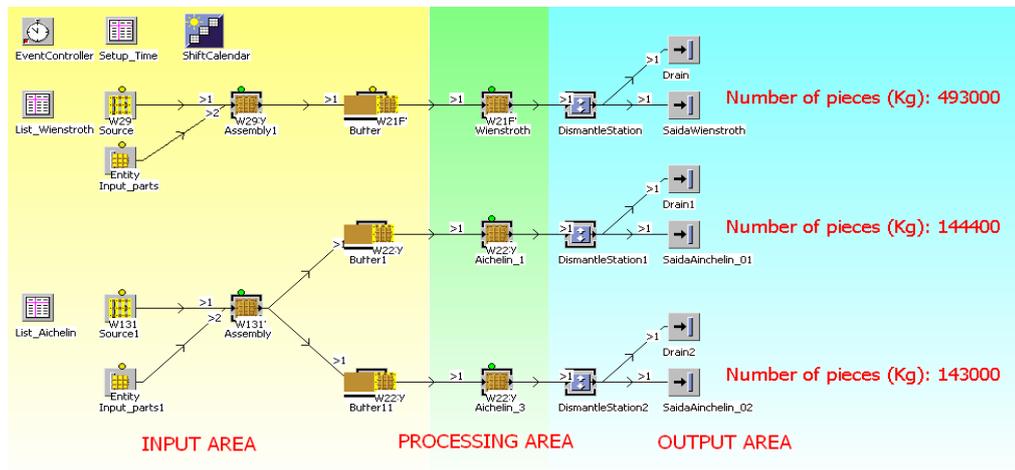


FIGURA 44: SEGUNDO CENÁRIO FUTURO.

A Figura 45 ilustra o modelo referente ao terceiro cenário desenvolvido. Nesta imagem também é possível observar o fluxo do sistema de produção dividido nas mesmas três partes do sistema anterior. As duas linhas contando com dois Forno W são observadas.

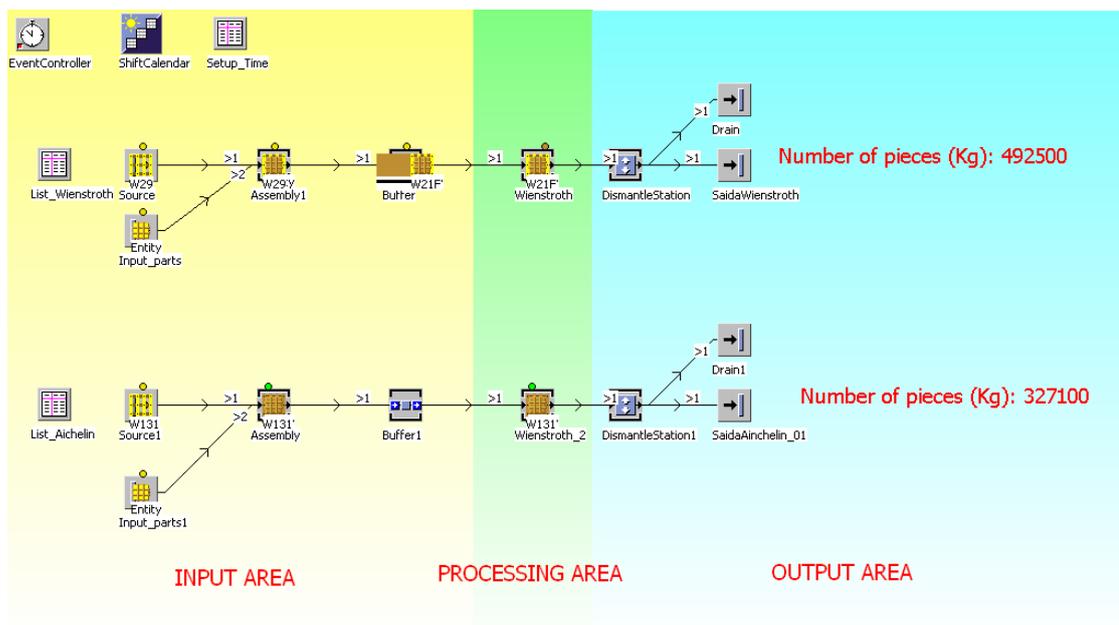


FIGURA 45: TERCEIRO CENÁRIO FUTURO.

5.2.8. ANÁLISE E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

Ao final da simulação dos cenários, foi possível conhecer o tempo de carregamento total dos *buffers* localizados antes da entrada dos fornos e também a porcentagem de tempo que o envio de peças fica bloqueado, sendo possível identificar os gargalos do sistema e a ociosidade dos equipamentos. Estas informações auxiliaram a tomada de decisão sobre qual cenário atende as necessidades da empresa. Os resultados estão ilustrados na Tabela 5.

Tabela 5: Tabela com os resultados da simulação

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Produção do Forno W (Kg)	492.900	492.500	493.900	492.900
				327100
Produção do Forno A1 (Kg)	124.770	N/A	N/A	N/A
Produção do Forno A3 (Kg)	143.900	146.100	144.400	N/A
			143.000	
Bloqueio no envio de peças do <i>buffer</i> para os fornos	3,12%	7,05%	3,05%	0,00%
Quantidade de tempo do <i>buffer</i> com a capacidade máxima.	78,36%	94,18%	75,33%	0,00%

Com as informações acima é possível observar os resultados obtidos em cada um dos cenários utilizando como objeto de comparação a quantidade de peças produzidas, os bloqueios no envio de peças por conta da capacidade total nos *buffers* (caracterizando gargalo) e a porcentagem de tempo em que os *buffers* estão em sua capacidade máxima.

5.3. CASO 3 – JUSTIFICATIVA DE INVESTIMENTO PARA NOVAS TECNOLOGIAS DE CORTE

O investimento em novos equipamentos deve ser realizado de forma consistente e seguro evitando desperdícios de recursos. Com este pensamento, uma empresa fabricante de máquinas do interior de São Paulo, utilizou a simulação para nortear as .

Neste caso, houve a comparação entre os cenários atual e o cenário futuro, no qual os dados do cenário inicial foram adquiridos por meio de visitas ao

ambiente de produção. O cenário futuro foi modelado por meio de informações de catálogos e visitas em parceiros que possuem equipamentos similares.

A Figura 46 ilustra as etapas do desenvolvimento deste projeto utilizando como base o modelo proposto nesta dissertação.

Modelo Proposto	Etapas do Trabalho
Definição do problema.	Comparar os cenários utilizando o equipamentos atual (Oxicorte) com o pretendido (Serra).
Caracterização do sistema de produção por meio do VSM.	N/A
Levantamento dos dados.	Tempos de processamento; Fluxo do produto; Histórico de quebras, refugos e medições; Tempos de setup; Forma de movimentação dos itens; Percurso e atividades dos operadores.
Tratamento estatístico dos dados.	Definição das distribuições estatísticas dos eventos do processo.
Desenvolvimento da lógica do modelo.	Definir estratégia de modelagem; Criar a lógica do modelo; Definir as ferramentas a serem utilizadas; Criar modelo simplificado.
Verificação da lógica.	Certificar que o modelo simplificado respeita a lógica definida.
Modelagem do sistema.	Criar o modelo final.
Validação do modelo.	Certificar que o modelo final respeita o sistema real de produção.
Simulação de novos cenários ou otimização do sistema utilizando as técnicas da manufatura enxuta.	Simular dois cenários, um com o processo de oxicorte e outro com o processo de serra.
Análise dos resultados.	Verificar os gráficos e dados extraídos da simulação ou otimização.
Verificação da necessidade de simular novamente.	N/A
Compilar os dados e concluir.	Resumir os resultados em um relatório final.
Responder o problema inicial.	Apresentar e finalizar o caso.

FIGURA 46: ETAPAS DO CASO 3.

5.3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O objeto deste caso é fornecer informações comparativas entre duas diferentes tecnologias de corte. Isto se deve por um aumento de 76% na demanda, na qual a questão deste caso é optar entre dois cenários futuros: [1] duplicar o

processo de fabricação existente; [2] investir em um novo sistema de corte automatizado.

Para o comparativo entre os dois cenários foi utilizada a simulação que gerou informações referentes à: quantidade de peças produzidas em um mesmo período; quantidade de operadores necessários para executar o trabalho.

Este estudo deve também verificar se é possível atender a nova demanda solicitada pelo cliente que inicialmente é de 8.500 peças por dia passando para 15.000 peças por dia.

5.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO POR MEIO DO VSM

Para o melhor entendimento do sistema de produção foi desenvolvido um VSM do sistema atual, que representa os equipamentos do corte da estado atual do processo Figura 47.

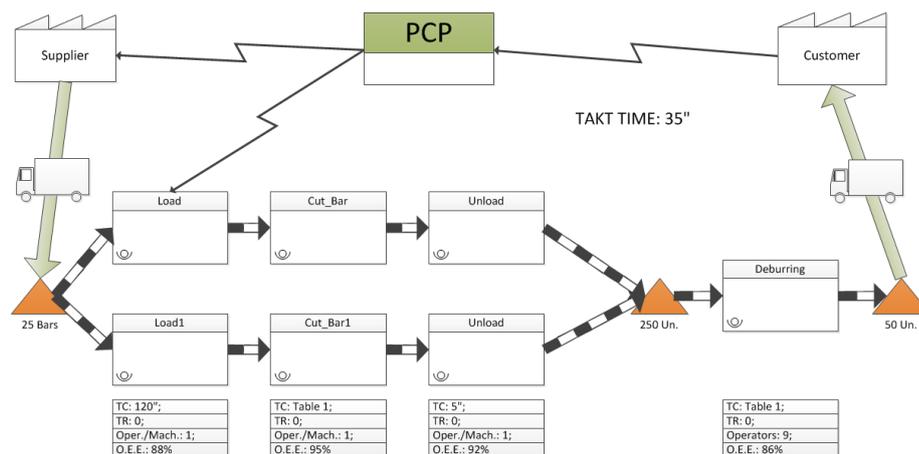


Figura 47: VSM atual, oxicorte.

As informações referentes ao tempo de processo nas operações de corte e rebarbação dependem do tipo de peça que está no sistema. São cortados trinta tipos diferentes de peças neste sistema onde os dados podem ser observados na Tabela 2Tabela 6.

Tabela 6: Tabela com TC do corte e rebarbação.

Tempo de ciclo do corte e rebarbação segundo as peças					
Peça	TC Corte (Seg.)	TC: Rebarbação (Seg.)	Peça	TC Corte (Seg.)	TC: Rebarbação (Seg.)
1	35,25	252	16	27,75	215
2	41,25	220	17	31,5	220

3	39	301	18	33	225
4	41,25	310	19	33	225
5	36	255	20	32,25	235
6	39	301	21	41,25	312
7	39	30	22	41,25	307
8	40,5	302	23	41,25	309
9	27,75	220	24	29,25	225
10	33,75	230	25	39	301
11	32,25	227	26	41,25	295
12	36	257	27	39	287
13	39	305	28	35,25	256
14	39	303	29	31,5	289
15	40,5	302	30	33,75	280

Neste mapeamento é possível observar algumas características do processo estudado:

- O takt time é de 35 segundos e se refere à necessidade de atendimento da linha de montagem, que neste estudo é o cliente e utiliza 8.500 peças por dia;
- Dois equipamentos em paralelo são necessários para atender o takt time;
- Os quatro operadores nas fases de carregamento, oxi-corte e descarregamento somado aos nove operadores da rebarbação totalizam treze (13) operadores para cada turno de trabalho;
- O VSM foi calculado com a disponibilidade de vinte e uma (21) horas de trabalho por dia.

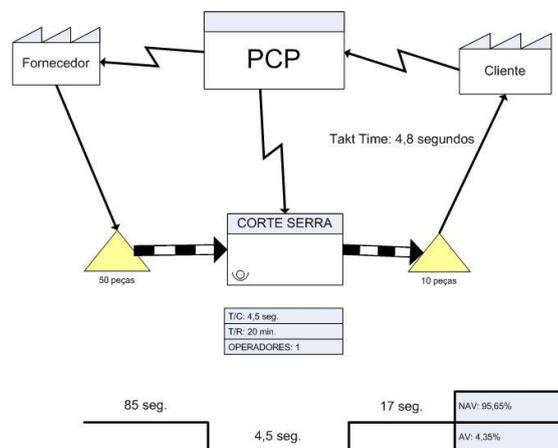


Figura 48: VSM final, corte a serra.

No VSM final, é possível observar as alterações realizadas para atender as novas necessidades de demanda, dentre elas a mais significativa é a redução do *takt time* para 4,8 segundos.

5.3.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento dos dados se deu por meio de visitas ao sistema de produção onde foram medidas as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo. As medidas de tempo, *setup* e refugo podem ser vistas na Tabela 7.

Tabela 7: Tabela com os dados coletados no processo.

	Carregamento (s)	Descarregamento (s)
Tempo 1 (S)	20	10
Tempo 2 (S)	21	12
Tempo 3 (S)	24	10
Tempo 4 (S)	18	9
Tempo 5 (S)	19	9
Tempo 6 (S)	20	8
Tempo 7 (S)	25	11
Tempo 8 (S)	18	12
Tempo 9 (S)	18	11
Tempo 10 (S)	18	14
Tempo 11 (S)	19	10
Tempo 12 (S)	19	11
Tempo 13 (S)	20	12
Tempo 14 (S)	18	8
Tempo 15 (S)	23	9
Tempo 16 (S)	23	10
Tempo 17 (S)	20	8
Tempo 18 (S)	21	9
Tempo 19 (S)	25	8
Tempo 20 (S)	18	8
Tempo 21 (S)	19	9
Tempo 22 (S)	21	10
Tempo 23 (S)	19	10
Tempo 24 (S)	21	12
Tempo 25 (S)	20	13
Tempo 26 (S)	18	11
Tempo 27 (S)	21	8
Tempo 28 (S)	19	10
Tempo 29 (S)	18	11
Tempo 30 (S)	17	7
Media (S)	20	10
Desvio padrão (S)	2,17	1,70
Disponibilidade / quebras (%)	90%	90%

Em outro tratamento dos dados, a rebarbação foi representada por uma distribuição normal com parâmetros: média 150 segundos e desvio padrão de 11,35 segundos. Estes dados podem ser observados na Figura 51.

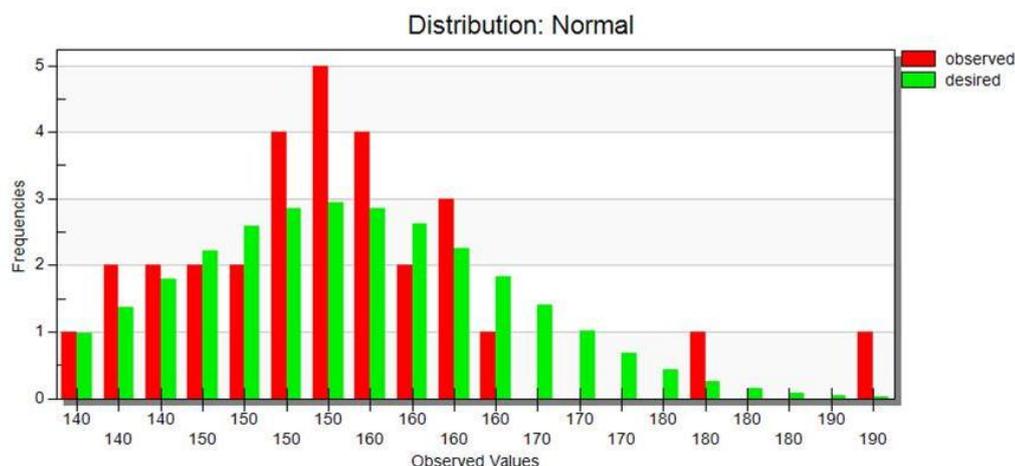


Figura 51: Tratamento dos dados da rebarbação.

5.3.5. DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO DA LÓGICA DO MODELO

O desenvolvimento da lógica deste caso foi relativamente simples já que se trata de um fluxo sem variações. A verificação da lógica se deu por meio de contadores que certificaram que não havia desvio no fluxo do produto e por gráficos que vinculavam os operadores aos devidos postos de trabalho.

5.3.6. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

A modelagem do sistema foi realizada utilizando ferramentas que simulam a intervenção humana no sistema de produção além de respeitar a lógica desenvolvida e pode ser observada na Figura 52. Este modelo se divide em duas partes: na parte superior está a simulação do processo de corte por oxicorte; na parte inferior a simulação do corte por serra.

O modelo foi desenvolvido desta forma para facilitar a comparação entre as duas tecnologias já que todas as informações estão presentes na mesma imagem.

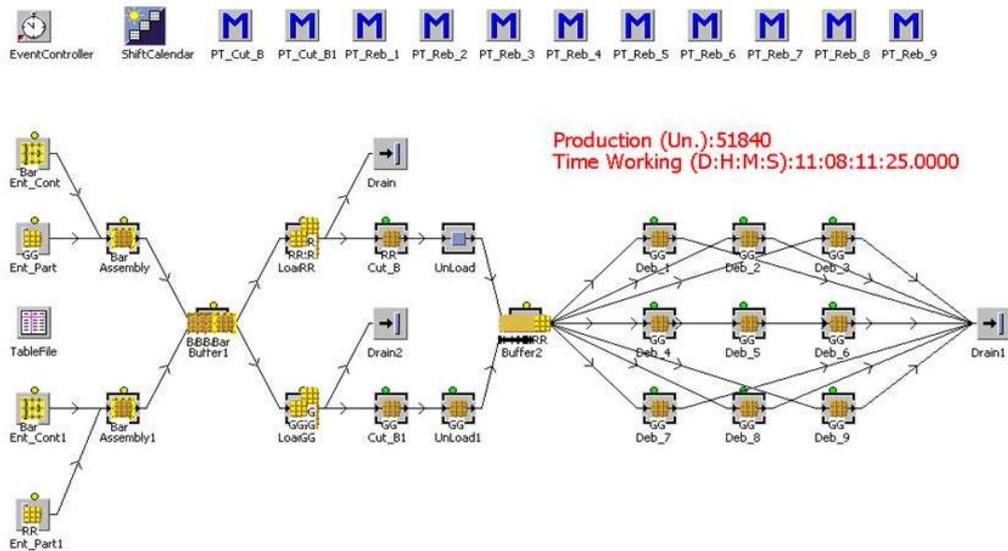


Figura 52: Modelo do estado atual do processo de corte.

A validação do modelo se deu por meio de comparação ente a quantidade de peças fabricadas no sistema real com a fabricada pela simulação, onde ao final de trinta dias de simulação foram produzidas 51.940 peças e o levantamento histórico da produção real era de 51.298 peças, uma diferença de 1,24% entre os sistemas. Esta mesma comparação foi realizado em um período de um ano, conforme observado na Tabela 8.

Tabela 8: Tabela comparativa entre produção real e simulada.

	Quantidade de peças produzidas - Real	Quantidade de peças produzidas - Simulado	Aderência (%)
30 dias	51.298 (Units)	51.940 (Units)	98,76%
365 dias	615.582 (Units)	621.615 (Units)	99,02%

O cenário 1 será considerada a duplicação dos dados obtidos no cenário atual, isto porque para a primeira opção de escolha consiste em duplicar os equipamentos existentes.

O cenário 2 foi simulado utilizando as informações do catálogo do novo equipamento e por informações obtidas em empresas que já utilizam este sistema. A Figura 53 ilustra o modelo construído para a simulação do cenário 2.

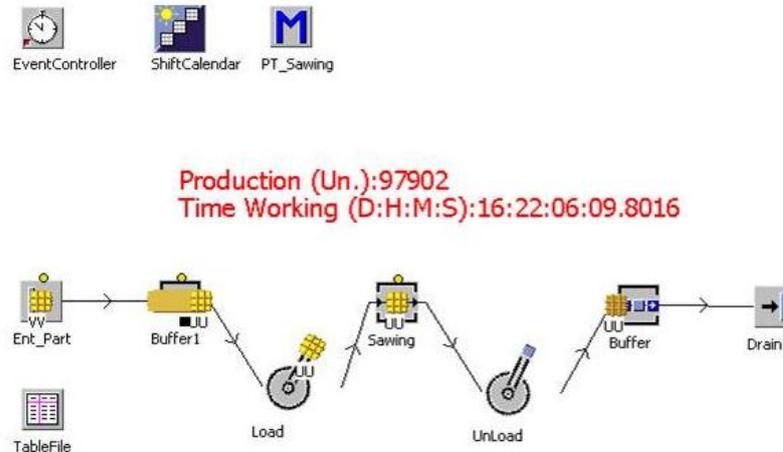


Figura 53: Modelo do cenário 2 do sistema de corte.

5.3.7. ANÁLISE E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

Ao final da etapa de simulação, desenvolvidos gráficos para facilitar a compreensão dos dados. A Figura 54 ilustra os resultados referentes a simulação do sistema atual, a Figura 55 ilustra os resultados do sistema futuro e a Tabela 9 apresenta o comparativo de quantidade de peças produzidas entre os dois sistemas.

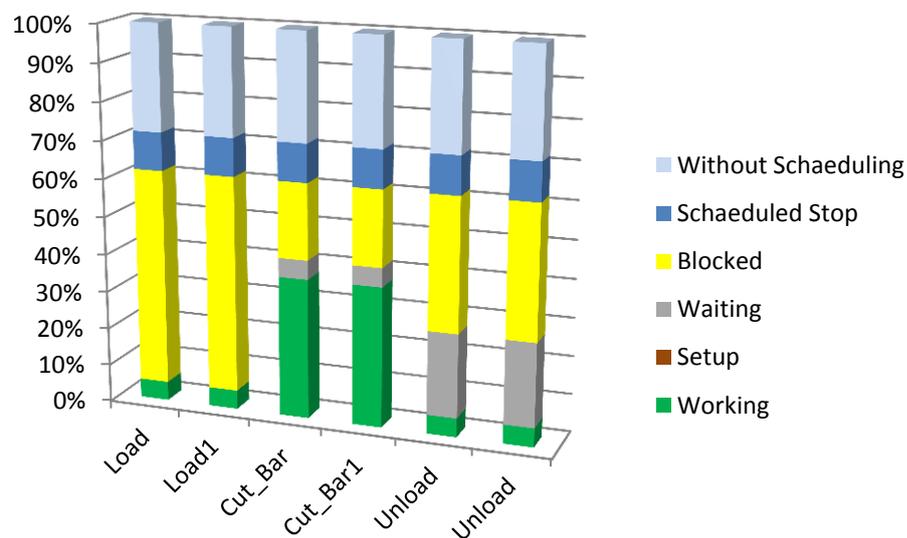


Figura 54: Dados da simulação do sistema de corte por oxicorte.

O gráfico acima demonstra alta porcentagem em tempo em esperas e bloqueios, isso ocorre devido ao desbalanceamento existente entre as três

primeiras estações de trabalho, pode-se observar também a alta quantidade de tempo necessária para a rebarbação atender o sistema de corte.

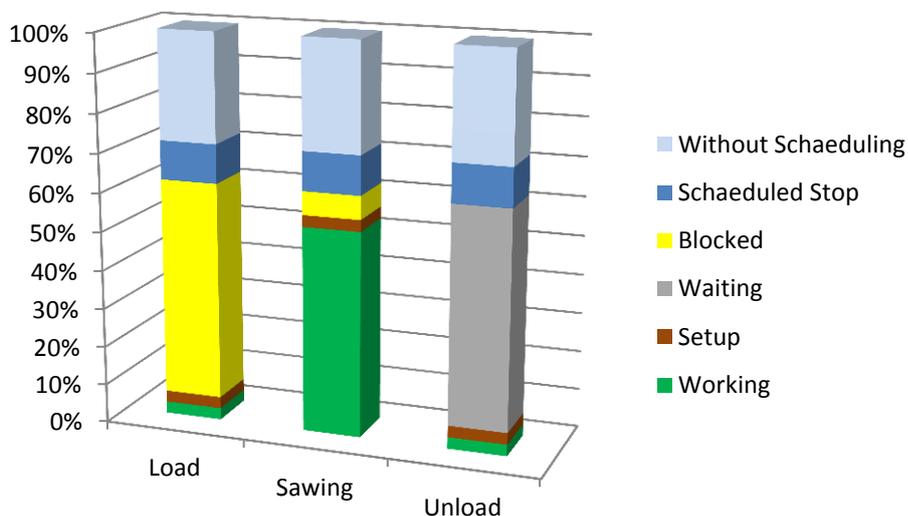


Figura 55: Dados da simulação do sistema de corte por serra.

O novo sistema de corte proposta apresenta apenas dois postos de trabalho, o corte a serra e o descarregamento do sistema, é possível notar o balanceamento das atividades, isso é observado devido a inexistência de bloqueios neste sistema.

Tabela 9: Informações comparativas entre os cenários 1 e 2.

	Atual	Cenário 1	Cenário 2
Peças produzidas por dia (Un.)	2.137	4.274	4.079
Custo unitário médio (\$)	97,52	92,30	64,47
Custo de investimento (R\$)	-	1.300.000	1.800.000
Quantidade de operadores	13	26	4
Área Ocupada (m ²)	168	284	155

A tabela acima apresenta o comparativo entre os dois sistemas de corte utilizando como indicador a quantidade de peças fabricadas, no qual é possível fornecer informações para tomada de decisão.

5.4. CASO 4 – CRIAÇÃO DE NOVOS CENÁRIOS PARA A MELHORIA DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

As alterações realizadas nos sistemas de produção, na maioria das vezes tentam melhorar os indicadores deste sistema, sejam eles econômicos ou de maior produtividade. Em contrapartida, qualquer teste realizado no chão de fábrica requer a parada do sistema por alguns instantes, outro ponto negativo é a incerteza do sucesso da modificação. Tentando evitar estes transtornos, a simulação propõe a criação de cenários já validados antes dos testes definitivos no sistema de produção.

Este caso mapeou um processo de usinagem de rolamentos em uma empresa do interior de São Paulo, no qual, o objetivo foi a simulação de cenários contendo modificações que alteraram o rendimento do sistema.

A Figura 56 ilustra as etapas do desenvolvimento deste projeto utilizando como base o modelo proposto nesta dissertação.

Modelo Proposto	Etapas do Trabalho
Definição do problema.	Baixo rendimento das máquinas devido ao excesso de paradas e <i>setups</i> .
Caracterização do sistema de produção por meio do VSM.	Modelo de processo de manufatura; Tipo de Arranjo físico.
Levantamento dos dados.	Layout do processo; Tempos de processamento; Fluxo do produto; Criação do VSM atual e futuro do sistema; Histórico de quebras, refugos e medições; Tempos de setup; Forma de movimentação dos itens; Percurso e atividades dos operadores.
Tratamento estatístico dos dados.	Definição das distribuições estatísticas dos eventos do processo.
Desenvolvimento da lógica do modelo.	Definir estratégia de modelagem; Criar a lógica do modelo; Definir as ferramentas a serem utilizadas; Criar modelo simplificado.
Verificação da lógica.	Certificar que o modelo simplificado respeita a lógica definida.
Modelagem do sistema.	Criar o modelo final.
Validação do modelo.	Certificar que o modelo final respeita o sistema real de produção.
Simulação de novos cenários ou otimização do sistema utilizando as técnicas da manufatura enxuta.	Criar novos cenários aplicando as ferramentas da manufatura enxuta e padronizando o tamanho dos lotes de

	produção.
Análise dos resultados.	Verificar os gráficos e dados extraídos da simulação ou otimização.
Verificação da necessidade de simular novamente.	Verificação da necessidade de simular novamente.
Compilar os dados e concluir.	Resumir os resultados em um relatório final.
Responder o problema inicial.	Apresentar e finalizar o caso.

FIGURA 56: ETAPAS DO CASO 4.

5.4.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O auto custo da manufatura está comprometendo a competitividade de um setor de usinagem perante as outras plantas da companhia. Em estudos prévios este custo está relacionado a baixa disponibilidade dos equipamentos do processo. Neste cenário foi sugerida a implantação de técnicas da manufatura enxuta visando aumentar a disponibilidade dos equipamentos.

Este caso tem como objetivo aplicar a simulação para gerar cenários futuros e dimensionar os ganhos com a aplicação das ferramentas.

5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO POR MEIO DO VSM

O sistema de produção estudado é caracterizado por operações de usinagem realizadas em tornos CNC que usinam peças de três diâmetros diferentes, sendo necessário setup para a preparação das máquinas. Este sistema contém cinco células de usinagem que recebem matéria prima do setor de forjamento. Cada célula de usinagem é composta por um operador e dois tornos CNC. A Figura 57 ilustra o VSM inicial do sistema de produção.

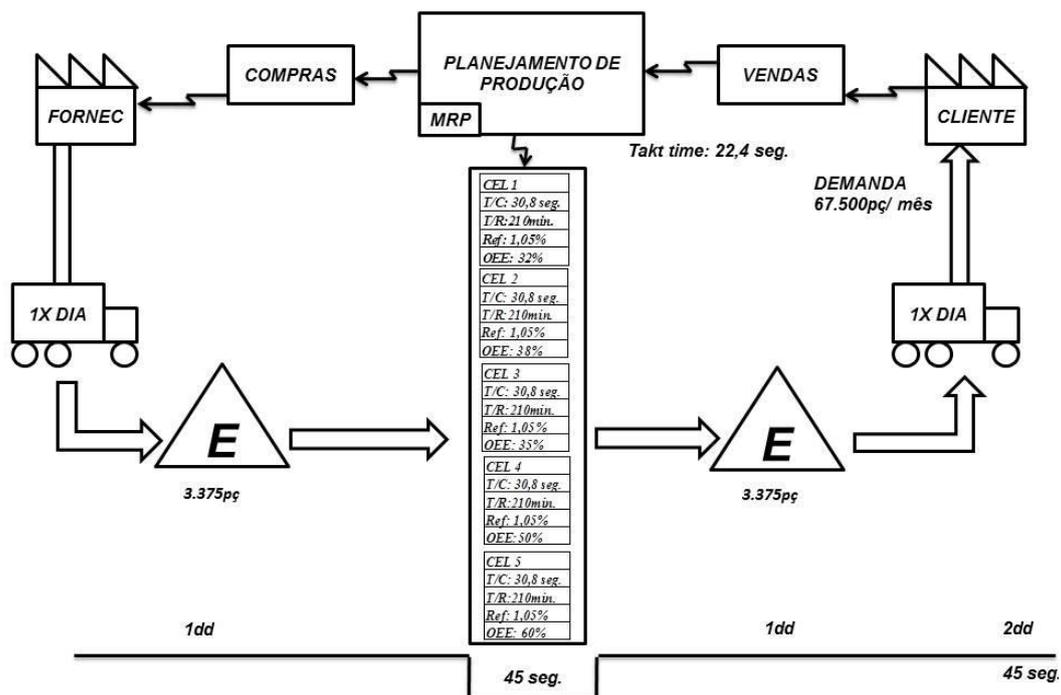


Figura 57: VSM do estado atual.

Observa-se na Figura 57 que a operação de tratamento térmico (cliente) apresenta uma demanda de 67.500 peças mensais, o que resulta em um *takt time* de 22,4 seg. A matéria prima (peças forjadas) é enviada pelo fornecedor diariamente para um estoque.

A operação de usinagem é realizada por 5 células individuais que trabalham paralelamente e apresenta as seguintes características: tempo de ciclo (*T/C*) de 45seg.; tempo de *setup* (*T/R*) de 210 min. e taxa de defeito de 1,05%. O índice de eficiência global (*OEE – Overall Equipment Effectiveness*) varia para cada célula de usinagem na ordem de 32 à 60%. Após a operação de usinagem, as peças são enviadas para um estoque intermediário.

Outra observação importante da Figura 57 relaciona-se ao tempo de atividades que agregam (*AV*), e as atividades que não agregam valor (*NAV*), dados respectivamente por 45 segundos, tempo necessário para o processamento do produto na célula de usinagem, e 2 dias, somatória dos estoques localizados antes e depois do processo de usinagem. Desta forma, o índice de eficiência do processo (*PEC – process cycle efficiency*) desta célula é de 0,1%.

5.4.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento dos dados se deu por meio de visitas ao sistema de produção onde foram medidas as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo. As medidas de tempo de processamento, *setup*, O.E.E. quantidade de refugo podem ser vistas na Figura 57.

5.4.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Por se tratar de operações automáticas o tempo de processamento foi considerado um valor constante de 30,8 segundos por operação. A taxa de quebras é considerada um fator importante para os índices de disponibilidade, o histórico destas falhas forma tratados e podem ser observados na Figura 58.

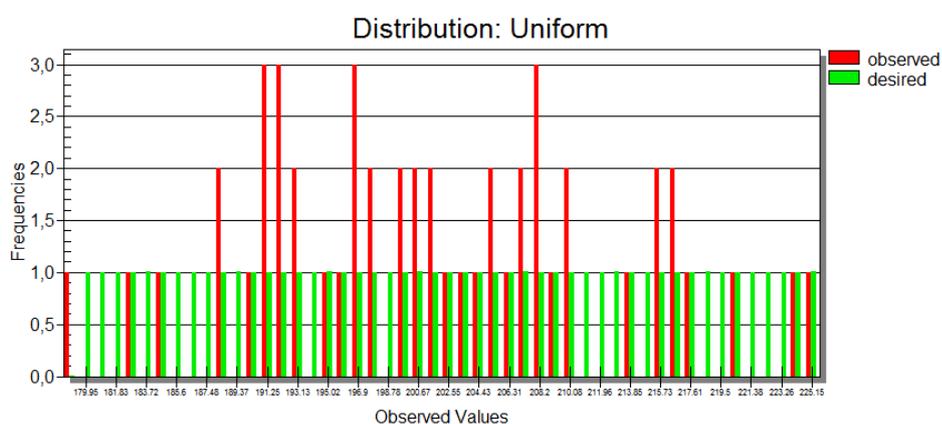


Figura 58: Distribuição que representa o histórico de falhas no sistema.

5.4.5. DESENVOLVIMENTO E VERIFICAÇÃO DA LÓGICA DO MODELO

O desenvolvimento da lógica deste caso teve como objetivo respeitar o fluxo mapeado no VSM atual. A verificação da lógica se deu por meio de contadores que certificaram que não havia desvio no fluxo do produto e por gráficos que vinculavam os operadores aos devidos postos de trabalho.

5.4.6. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SISTEMA

A modelagem do sistema respeitou a lógica desenvolvida e pode ser observada na Figura 59 onde são encontradas informações sobre a quantidade de equipamentos existentes no sistema e a divisão das atividades envolvidas na manufatura das peças.

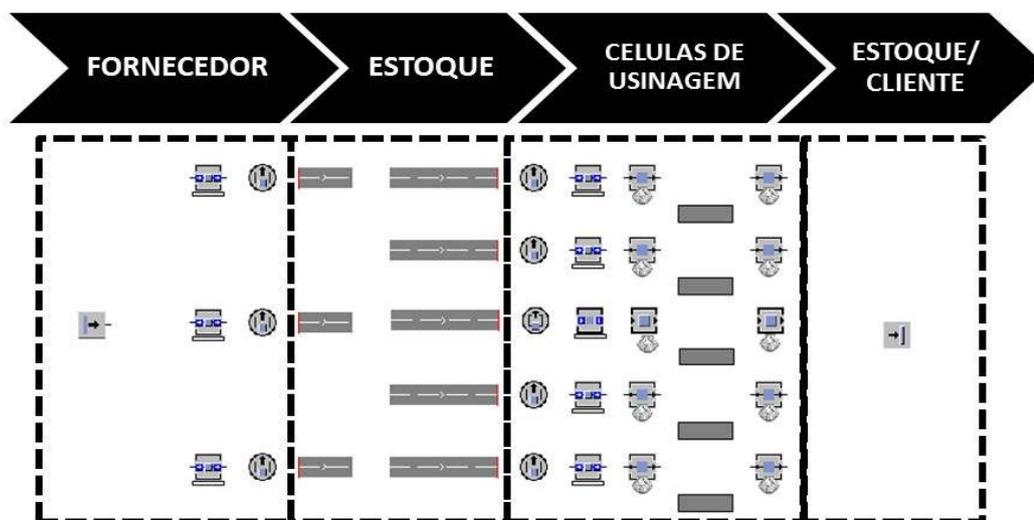


Figura 59: Modelo de simulação.

A figura acima ilustra o modelo criado para a representação do sistema atual de produção, na qual cada uma das quatro etapas do processo está dividida em: fornecimento das peças; estoque de peças antes destas entrarem no processo de usinagem; processo de usinagem dividido em células; saída das peças do sistema de simulação.

Após a simulação do sistema de produção, realizou-se a validação dos resultados da simulação por meio da comparação do indicador de quantidade de peças produzidas em um período de vinte e seis dias, conforme mostra a Tabela 10. É possível observar duas colunas com a quantidade de peças fabricadas em cada célula e a aderência entre os sistemas.

Tabela 10: Quadro de validação do sistema simulado.

Operação de Usinagem	Valor Real	Valor Simulado	Aderência (%)
Célula 1	12.986	12.823	98,7
Célula 2	15.448	15.724	98,2
Célula 3	13.486	13.031	96.6
Célula 4	18.267	18.803	97.1
Célula 5	21.030	21.788	96.5

Ao final de cinco dias de produção foi anotada a quantidade de peças produzidas, este mesmo procedimento foi realizado com o modelo de simulação. Em seguida estes valores foram ordenados na Tabela 2 e analisada a aderência entre os dois sistemas. É possível notar que o menor valor

encontrado foi 96,5% e que o maior valor de aderência foi 98,7% o que foi considerado aprovado para a sequência do trabalho.

5.4.7. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICA DA MANUFATURA ENXUTA

A simulação do sistema de produção foi realizado em quatro passos, isso ocorreu devido à necessidade de novas intervenções pois as três primeiras não foram suficientes para atingir o objetivo.

No primeiro cenário considerou-se uma mudança de *layout* nas células de produção com o objetivo de aproximá-las, a Figura 60 ilustra o *layout* inicial e a Figura 61 ilustra o novo *layout*, desta forma, utilizar três operadores no sistema de produção. O fluxo de produção ocorre no sentido indicado pela seta.

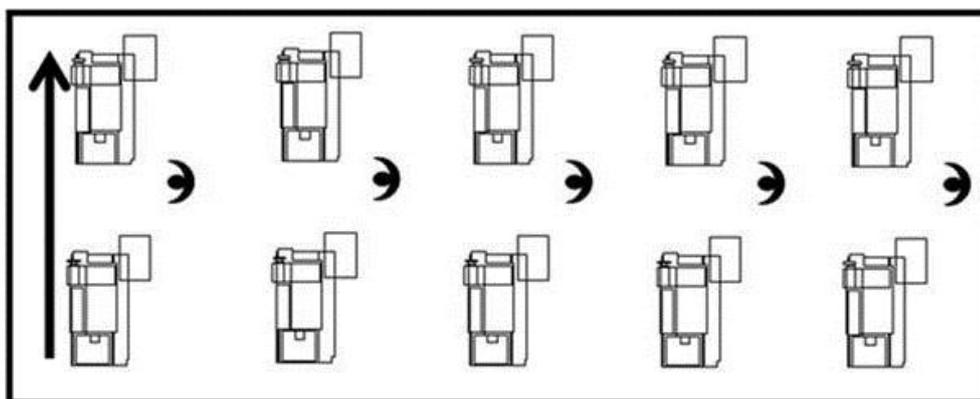


Figura 60: *layout* inicial.

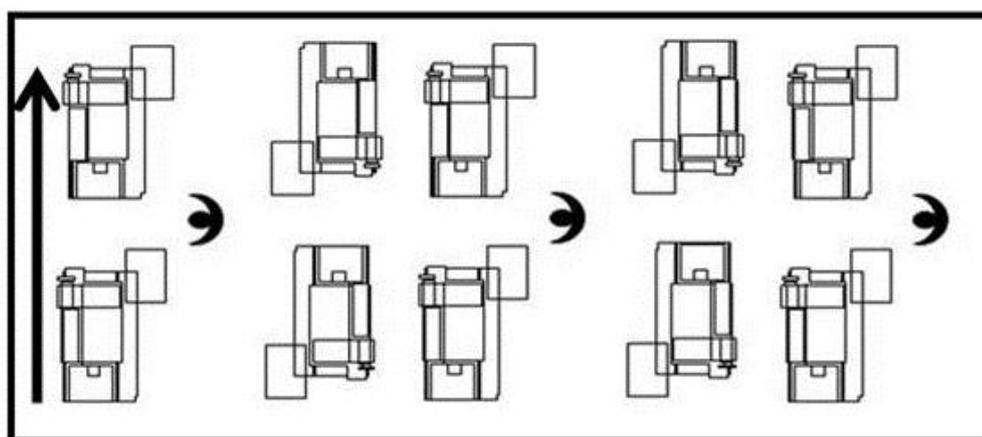


Figura 61: novo *layout* do sistema.

No segundo cenário foram consideradas as modificações do cenário 1 e a padronização dos lotes de produção para 600 peças além da redução do

tempo de *setup* de 210 minutos para 90 minutos. Para atingir a redução do tempo de *setup* propõe-se a utilização da ferramenta SMED (*single minute exchange of die*) nas células de usinagem.

O terceiro cenário propõem melhorias dos índices OEE das células de usinagem visando o aumento da disponibilidade dos equipamentos. Esta melhoria pode ser obtida por meio da aplicação da ferramenta de TPM (*Total Productive Maintenance*). Desta forma, o cenário 3 apresentou índices OEE de 40%, 42%, 40%, 55% e 67% respectivamente para as células 1-5.

O cenário 4 contempla a implementação das seguintes modificações no cenário 3: redução do tempo de *setup* de 1,5 horas para 1 hora; melhoria e padronização do OEE de 70% em todas as células de usinagem, eliminação de uma célula de usinagem e redução de um operador por turno.

5.4.8. ANÁLISE E CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

O resultado da simulação para o primeiro cenário mostrou que mesmo com a redução na quantidade de operadores por turno de trabalho, a quantidade de peças fabricadas não se alterou.

Com as alterações executadas no segundo cenário, o resultado da simulação indicou um aumento de 5,5% na quantidade de peças produzidas, passando de 82.169 para 86.726. Isto deve-se à maior disponibilidade dos equipamentos, decorrente da redução do tempo de *setup* em 2,5%.

O resultado da simulação para o cenário 3 indicou o aumento da produção para 110.905 peças, o que representa um aumento de 27,8% em relação ao cenário 2.

A simulação do cenário 4 indicou o aumento da produção para 126.153 peças, o que representa um aumento de 14,6% em relação ao cenário 3 e um aumento de 53,5% em relação à condição inicial.

A Tabela 11 ilustra o comparativo entre os ganhos ocorridos com as ações simuladas no sistema de produção.

Tabela 11: Resultados da simulação dos cenários propostos.

	Sistema de Produção	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário VI
Tempo de Processo (seg.)	45	45	45	45	45
Tempo de Setup (Min.)	210	210	90	90	60
OEE Célula 01	32%	32%	40%	45%	70%
OEE Célula 02	38%	38%	42%	45%	70%
OEE Célula 03	35%	35%	40%	45%	-
OEE Célula 04	50%	50%	55%	70%	70%
OEE Célula 05	60%	60%	67%	70%	70%
Operadores Turno 1	5	3	3	3	2
Operadores Turno 2	5	3	3	3	2
Operadores Turno 3	2	2	2	2	2
Tamanho do Lote (Peças)	1.500	600	600	600	600
Quant. Peças Produzidas	82.169	82.169	86.726	110.905	126.153
Ganho em relação a condição inicial	-	-	5,50%	34,90%	53,50%

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Ao final desta dissertação foi possível concluir que o método proposto para melhorar sistemas de produção baseado em simulação de eventos discretos e manufatura enxuta pôde ser aprovado.

Esta conclusão se deu pois os quatro casos que aplicaram este método apresentaram melhoras em seus sistemas de produção, ou ofereceram condições para auxiliar as tomadas de decisões visando esta melhora, de forma detalhada:

- o primeiro caso apresentou em seus resultados o valor ideal de WIP para o sistema de produção estudado e reduziu o custo do estoque em processo;
- no segundo caso foram apresentadas condições para auxiliar a tomada de decisão dando condições de visualização dos cenários futuros;
- o caso três também ofereceu condições para comparar duas tecnologias diferentes mesmo que se tratassem de condições diferentes de atuação, foi possível também certificar que o cenário futuro atenderia as novas necessidades de demanda;
- o quarto caso apresentou um conjunto de novos cenários, cada um com novas ferramentas da manufatura enxuta implementadas, e foi possível avaliar a evolução do sistema de produção ao longo do processo.

Em todos os modelos foi possível aplicar pelo menos uma ferramenta da manufatura enxuta para melhoria do sistema de produção, foi possível utilizar o VSM em três dos quatro casos além do SMED, TPM e balanceamento de atividades.

Outra importante observação referente à aplicação do método foi o ganho de aderência do sistema real com o simulado após o tratamento dos dados por meio das ferramentas distribuição estatístico que melhor representa o sistema real.

Como sugestão de novos trabalhos seria de vital importância aplicar este método em um caso mais complexo, onde outras ferramentas da manufatura

enxuta, como o kanban e o fluxo contínuo fossem objeto de estudo. Como outra sugestão seria importante o desenvolvimento um método que abrangesse as questões da logística e cadeia de suprimentos, onde seria possível estudar melhorias nestes pontos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulmalek, F. A. e Rajgopal, J. 2007.** Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of Production Economics*. 2007, pp. 223-236.
- Aken, E.M.V., et al. 2010.** A framework for designing, managing, and improving Kaizen event programs. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2010, Vol. 59, 7.
- Andrew, Greasley. 2005.** Using system dynamics in a discrete-event simulation of a manufacturing plan. *International Journal of Operations & Production Management*. 2005, Vol. 25, 6.
- Aomar, R.A. 2011.** Handling multi-lean measures with simulation and simulated annealing. *Journal of the Franklin Institute*. 2011, 348.
- Banks, J. 1998.** *Handbook of simulation*. New York : Jerry Banks, 1998.
- Barros, G. J. M., Farias Filho, R. J. e Carneira, C.A.G.V., Farias, A.P.P. 2005.** Revisão bibliográfica sobre a manufatura ágil e comparação e diferenciação entre três eras produtivas. *Revista Produção OnLine*. 01 de Março de 2005.
- Baykasoğlu, A. e Durmuşoğlu, Z. D. U. 2012.** Flow time analyses of a simulated flexible job shop by considering jockeying. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012, pp. 693-707.
- Benjamin, S.J., Murugaiah, U. e Marathamuthu, M.S. 2013.** The use of SMED to eliminate small stops in a manufacturing firm. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2013, Vol. 24, 5.
- Béranger, P. 1989.** *As novas regras de produção*. Lisboa : Lidel, 1989.
- Bussab, W.O. e Morettin, P.A. 2010.** *Estatística Básica*. São Paulo : Saraiva, 2010.
- Camisón, C. e López, A.V. 2010.** An examination of the relationship between manufacturing flexibility and firm performance. *International Journal of Operations & Production Management*. 2010, Vol. 30, 8.
- Casella, G. e Berger, R.L. 2011.** *Influência Estatística*. São Paulo : Cengage Learning, 2011.
- Chee, S. L., Chong, M. Y. e Chin, J. F. 2012.** Milk-run kanban system for raw printed circuit board withdrawal to surface-mounted equipment. *Journal of Industria Engineering and Management*. 2012, pp. 382-405.
- Cheng, L.C. 2011.** Assessing performance of utilizing organizational modularity to manage supply chains: Evidence in the US manufacturing sector. *Int. J. Production Economics*. 2011, 131.
- Chowdary, B.V. e George, D. 2012.** Improvement of manufacturing operations of a pharmaceutical company. *Journal Of Manufacturing Technology Management*. 2012, Vol. 23, 1.

- Conceição, S.V., et al. 2009.** Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para troca rápida de ferramentas em ambientes de manufatura contratada. *Gestão e Produção*. 2009, Vol. 13, 3.
- Corrêa, H.L. e Corrêa, C.A. 2012.** Administração da Produção e Operações. *Administração da Produção e Operações*. São Paulo : Atlas, 2012.
- Cousens, A., Szwejcowski, M. e Sweeney, M. 2009.** A process for managing manufacturing flexibility. *International Journal of Operations & Production Management*. 2009, Vol. 29, 4.
- Deming, W. 2000.** *Out of the crisis: Quality, Productivity and Competitive Position*. Cambridge, MA : The MIT Press, 2000.
- Dhouib, K., Gharbi, A. e Landolsi, N. 2010.** Availability modelling and analysis of multi-product flexible transfer lines subject to random failures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, 50.
- Donaire, D. 1999.** *Gestão ambiental na empresa*. São Paulo : Atlas, 1999.
- Dreher, A., Gassebner, M. e Siemers, L.H.R. 2012.** Globalization, Economic Freedom, and Rights. *Journal of Conflict Resolution*. 30 de Maio de 2012, pp. 516-546.
- Erjavec, J., Gradisar, M. e Trkman, P. 2012.** Assessment of stock size to minimize cutting stock production costs. *Int. J. Production Economics*. 2012, pp. 170-176.
- Filip, F.C., et al. 2012.** Method for optimization Production Systems by Computer Aided Modeling and Simulation. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 2012, Vol. 5, 1.
- Freitas, P.J. 2001.** *Introdução a modelagem e simulação de sistemas*. Florianópolis : Visual Books, 2001.
- Gaither, N. e Frazier, G. 2002.** Administração da Produção e Operações. *Administração da Produção e Operações*. São Paulo : Thomson, 2002.
- Glover, W.J., et al. 2013.** Characteristics of established kaizen event programs: an empirical study. *International Journal of Operations & Production Management*. 2013, Vol. 33, 9.
- Gurumurthy, A. e Kodali, R. 2011.** Design of lean manufacturing systems using value stream mapping with simulation. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2011, pp. 444-473.
- Harrel, C.R., et al. 2002.** *Simulação. Otimizando os sistemas*. São Paulo : IMAN, 2002.
- Hopp, W.J. e Spearman, M.L. 2013.** *A ciência da fábrica*. Porto Alegre : Bookman, 2013. 978-85-65837-05-7.
- Hui, Z. 2012.** Efficient graduate employment serving system based on queuing theory. *Journal of Computers*. 2012, Vol. 7, 9.
- Inman, R. Anthony, et al. 2011.** Agile Manufacturing: Relation to JIT, operational performance and firm performance. *Journal of Operations Management*. 2011, pp. 343-355.
- Jeong, K.Y. e Phillips, D.T. 2011.** Application of a concept development processo to evaluate process layout using VSM and simulation. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2011, Vol. 4, 2.
- Joseph, O.A. e Sridharan, R. 2011.** Effects of routing flexibility, sequencing flexibility and scheduling decision rules on the performance of a flexible

manufacturing system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 27 de June de 2011, pp. 291-306.

Kaya, Y. 2010. Globalization and Industrialization in 64 Developing Countries, 1980-2003. *Social Forces*. 2010, Vol. 88.

Lange, R., Samoilovich, I. e Rhee, B.V.D. 2013. Virtual queuing at airport security lanes. *European journal of operational research*. 2013, Vol. 225.

Law, A. M. e Kelton, D. 1991. *Simulation Modeling and Analysis*. s.l. : McGraw-Hill, 1991.

Lin, F.J. e Chen, Y.M. 2012. A simulation model with synchronization manufacturing stations. *Management Decision*. 2012, Vol. 50, 7.

Lin, Y.K. e Chang, P.C. 2013. Reliability-based performance indicator for a manufacturing network with multiple production lines in parallel. *Journal of Manufacturing Systems*. 2013, 32.

Lopez, P. R. A., Santos, J. F. e Arbós, L.C. 2013. Lean manufacturing: costing the value stream. *Industrial Management & Data Systems*. 09 de Fevereiro de 2013, pp. 647-668.

Magalhães, N. M. 2004. *Probabilidade e Variáveis Aleatórias*. São Paulo : IME-USP, 2004. 85-88697-05-X.

Marksberry, P., et al. 2010. Management directed Kaizen: Toyota's Jishuken process for management development. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2010, Vol. 21, 6.

Matzka, J., Mascolo, M. e Furmans, K. 2012. Buffer sizing of a Heijunka Kanban System. *Journal Intell Manuf.* 2012, Vol. 23.

Melouk, S.H., et al. 2013. Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. *International Journal of Production Economics*. 2013, 141.

Miguel, P.A.C., et al. 2012. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro : Elsevier: ABEPRO, 2012.

Nomden, G. e Zee, D.J.V. 2008. Virtual cellular manufacturing: Configuring routing flexibility. *International Journal of Production Economics*. 2008, 112.

Phan, A.C., Abdallah, A.B. e Matsui, Y. 2011. Quality management pratics and competitive performan: Empirical evidence from Japanese manufacturing companies. *Int. J. Production Economics*. 2011, 133.

PMI Institute, Project Management. 2013. A guide to the project management body of knowledge. [A. do livro] Project Management Institute. *A guide to the project management body of knowledge*. Newtown Square Pensilvania : PMBOK Guide, 2013.

Prado, D. 1999. *Teoria das filas e da simulação*. Belo Horizonte : Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999. ISBN 85-86948-12-8.

Price, W., Gravel, M. e Nsakanda, A.L. 1994. A review of optimisation models of Kanban-based production systems. *European Journal of Operational Research*. 1994, 75.

Renna, P. e Ambrico, M. 2011. Evaluation of cellular manufacturing configurations in dynamic conditions using simulation. *Int J Adv Manuf Technol*. 2011, pp. 1235-1251.

- Rosa, H., Mayerle, S.F. e Gonçalves, M.B. 2010.** Controle de estoque por revisão contínua e revisão periódica: uma análise comparativa utilizando simulação. *Produção*. 2010, Vol. 20, 4.
- Sahoo, A.K., et al. 2008.** Lean philosophy: implementation in a forging company. *International Journal Advantury Manufacturing Technology*. 2008, 36.
- Sakurada, N. e Miyake, D. I. 2009.** Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações e serviços. 2009, pp. 25-43.
- Shook, J. e Rother, M. 2003.** *Aprendendo a enxergar: Mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar desperdício*. São Paulo : Lean Interprise Institute, 2003.
- Singer, M. e Donoso, P. 2008.** Assenssing an ambulance service with queuing theory. *Computer & Operation research*. 2008, Vol. 35.
- Singh, B.J. e Khanduja, D. 2010.** SMED: for quick changeover in foundry SMEs. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2010, Vol. 59, 1.
- Slack, N., et al. 1999.** Administração da Produção. [A. do livro] Atuart Chambers, Christine Harland, Allan Harrison, Robert Johnston Nigel Slack. *Administração da Produção*. São Paulo : Atlas, 1999.
- Sridharan, R. e Joseph, O.A. 2011.** Evaluation of routing flexibility of a flexible manufacturing system using simulation modelling and analysis. *Int J Adv Manuf Technol*. 2011, pp. 273-289.
- Tachizawa, T. 2002.** *Gestão ambiental e responsabilidade social corporativa*. São Paulo : Atlas, 2002.
- Topan, E. e Avsar, Z.M. 2011.** An aproximation for Kanban controlled assembly systems. *Ann Oper Res*. 2011, Vol. 182.
- Tseng, M.L. 2013.** Modeling sustainable production indicators with linguistic preferences. *Journal of Cleaner Production*. 2013, 40.
- Tubino, D.F. 2009.** *Planejamento do controle da produção. Teoria e Prática*. São Paulo : Atlas, 2009.
- Underwood, Robert L. 2012.** Automotive foreign direct investmente in the United States: Economic and market consequences of globalization. *SciVerse ScienceDirect*. 04 de Abril de 2012, pp. 463-474.
- Vinod, S., Arvind, K.R. e Somanathan, M. 2010.** Aplicacion of value stream mapping in an Indian camshaftmanufacturing organization. *Journal of Manufacturing Tecnology Management*. 2010, Vol. 21, 7.
- Vinod, V. e Sridharan, R. 2011.** Simulation modelind and analysis of due-date assignment methodes and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. *International Journal of Production Economics*. 2011, 129.
- Womack, J.P., Jones, D.T. e Roos, D. 1997.** *A máquina que mudou o mundo*. Rio de Janeiro : Campus, 1997.
- Yang, C. e Liu, H.M. 2012.** Boosting firm performance via enterprise agility and network structure. *Management Decision*. 2012, Vol. 50, 6.
- Zang, R., Chiang, W.C. e Wu, C. 2013.** Investigating the impact of operational variable on manufacturing cost by simulation optimization. *Internationa Journal of Production Economics*. 2013.