

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Leonardo Farias Campos

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA PARA
AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO MANUFATURADA

Divinópolis
2013

Leonardo Farias Campos

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA PARA
AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO MANUFATURADA

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Eixo de Formação: Modelagem, Controle e Automação de Processos e Simulação computacional

Orientador: Renato de Sousa Dâmaso

Co-orientador: Edgard Martins de Oliveira

Divinópolis
2013

Leonardo Farias Campos

CEFET/MG *Campus* Divinópolis

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA PARA
AUTOMAÇÃO DE CÉLULAS DE UMA LINHA DE PRODUÇÃO MANUFATURADA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentada ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - curso de Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato de Sousa Dâmaso
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Dr. Luiz Cláudio Oliveira
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Edílson Hélio Santana
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Edson Marchetti da Silva
CEFET/MG *Campus V*

Divinópolis
2013

A MINHA MÃE, PROFESSORES E
AMIGOS.

Agradecimentos

Agradeço,

aos meus pais, pelo apoio e compreensão não somente nos cinco anos de graduação, mas em toda minha trajetória.

ao meu orientador, Professor Doutor Renato de Sousa Dâmaso, pelo apoio durante todo o curso e pelas primeiras oportunidades como bolsista.

ao meu co-orientador, Edgard Martins de Oliveira, Engenheiro responsável da empresa, tutor e gestor, pelo suporte e disponibilidade de proposta.

aos meus professores e amigos do CEFET, que de alguma forma me auxiliaram na realização do trabalho, em especial ao Professor Cristian Herrera, pelos conselhos dados e oportunidades cedidas.

ao meu parceiro, Leonardo Schiwf pelo apoio dado pela empresa Simul8.

Cada sonho que você deixa para trás é um pedaço do seu futuro que deixa de existir, não desista daquilo que você não consegue parar de pensar todos os dias, *keep calm and work hard*.

Resumo

Com o aumento da competitividade do mercado, cada vez mais as fábricas são obrigadas a aperfeiçoar seus processos produtivos para continuarem lucrativas. Nesse contexto a simulação computacional juntamente com a otimização são ferramentas de fundamental importância para desenvolvimento de novos projetos, como a implantação de uma nova linha de manufatura. A simulação pode ser aproveitada nas mais variadas fases do desenvolvimento de uma nova linha, entretanto é na fase de projeto que são tomadas as decisões mais importantes. O presente trabalho visa a propor melhorias na linha de produção e aborda a aplicação da simulação e da otimização como ferramentas de auxílio ao planejamento de uma nova linha de manufatura de uma empresa do setor de autopeças, visando verificar a eficiência do método tradicional utilizado pela empresa onde nenhuma ferramenta computacional é utilizada. Além disso, propor um modelo de *layout* capaz de atender a demanda dos novos volumes do mercado. As análises do sistema de manufatura em questão e das propostas de melhorias foram feitas a partir de modelos baseados na teoria de Sistemas de Eventos Discretos (SED), cujas simulações computacionais foram realizadas utilizando o software Simul8. Esse enfoque estratégico está na possibilidade de usar o modelo criado para simular diversos cenários, com a completa ou parcial automação do processo devido ao aumento do volume de produção, sem provocar rupturas na produção pela necessidade de realizar experimentos reais.

Palavras chave: Sistemas de Eventos Discretos (SED), Simul8, linha de produção, autopeça.

Abstract

As competitiveness grows in the market, industries have to improve their processes to continue being lucrative. In that context, computer simulation, together with optimization are of fundamental importance to develop new projects, namely a new manufacture line process implementation. The simulation can be used in the varied new line develop stages, however is in the project stage that the most important decisions are made. The currently work aims at proposing improvements in the production line and discusses the application of simulation and optimization as assisting tools to planning a new manufacture line of a car part manufacturing company, with objective of verifying the traditional method efficiency, used by the company, where no computer tools are used. Furthermore, it proposes a layout model able to supply new demands of the market. The analysis of the manufacturing system and of the improvements proposals are made with models based on Discret Event Systems (DES), the computational simulations of which will be made using the software Simul8. The strategic focus is in the possibility to use the model made to simulate several scenarios, as complete or partial process automation, due to the production volume increased, without causing disruptions in the process due to the necessity to accomplish real experiments.

Keywords: Discret Event Simulation (DES), Simul8, production line.

Sumário

Lista de Figuras	xxi
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Acrônimos e Notação	xxv
Introdução Geral	1
1 Introdução	3
1.1 Considerações Iniciais	3
1.2 Identificação	3
1.3 Relevância	3
1.4 Motivação	4
1.5 Justificativa Econômica	5
1.6 Objetivo do Trabalho	6
1.6.1 Objetivos Secundários	7
1.7 Metodologia de Pesquisa	7
2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 Sistemas de Simulação	9
2.1.1 Considerações Iniciais	9
2.1.2 Sistemas Dinâmicos e Sistemas Estáticos	10
2.1.3 Sistemas Estocásticos e Sistemas Determinísticos	10
2.1.4 Sistemas Discretos e Sistemas Contínuos	11
2.1.5 Sistemas a Eventos Discretos	11
2.2 Tempos e Métodos	12
2.3 Medidas de Desempenho de um Sistema de Manufatura	14
2.3.1 Considerações Iniciais	14
2.3.2 Volume de Produção	15
2.3.3 <i>Lead Time</i> de Produção	15
2.3.4 Estoque de Processo	15
2.3.5 Taxa de Utilização do Centro de Trabalho e de Mão-de-obra	15

2.3.6	Eficácia	16
2.3.7	Eficiência	16
2.3.8	Capacidade	16
2.3.9	Produtividade	18
2.4	Sistemas de Manufatura	18
2.4.1	Layout	18
2.4.2	Balanceamento de Linhas	20
2.4.3	Setup	22
2.4.4	Método de Formação de Células	22
2.4.5	Capabilidade do Processo	23
2.5	Mapeamento de Processo	23
2.6	Estatística	24
2.6.1	Estatística Descritiva	24
2.6.2	<i>P-value</i>	25
2.7	Distribuições Estatísticas	26
2.7.1	Distribuição Normal	26
2.7.2	Distribuição Lognormal	27
2.7.3	Distribuição Exponencial	28
2.7.4	Distribuição Uniforme	28
2.8	Alto-falante	29
2.8.1	Conjunto Magnético	30
2.8.2	Conjunto Carcaça	30
2.8.3	Conjunto Móvel	31
3	Sistemas de Produção - Estudo de Caso	33
3.1	Considerações Iniciais	33
3.2	Descrição da Empresa	33
3.3	Descrição do Produto	33
3.4	Descrição do Processo	34
3.5	Descrição do Problema	37
3.6	Modelagem dos Dados	38
3.6.1	Coleta de Dados	39
3.6.2	Tratamento dos Dados	39
4	Proposta de Melhoria - Processo Automático	43
4.1	Introdução	43
4.2	Melhorias no Processo	43
4.3	Descrição do Processo Automático	45
4.4	Validação do Processo	47
5	Simulação Computacional	53
5.1	Sistema de Simulação	53
5.1.1	Definição do Sistema	53

5.1.2	Elementos do Sistema	53
5.1.3	Variáveis do Sistema	54
5.2	Metodologia de Simulação	54
5.3	Software de Simulação - Simul8	57
5.3.1	Modelo de Simulação	58
5.4	Simulação do Processo Manual	58
5.5	Simulação do Processo Automático	59
6	Resultados	61
6.1	Processo Manual	61
6.2	Processo Automático	66
6.3	Comparativo de Resultados	74
7	Conclusões e Perspectivas	79
7.1	Considerações Iniciais	79
7.2	Conclusões e Contribuições do Trabalho	79
7.3	Adequação com os Objetivos propostos	80
7.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	81
7.5	Considerações Finais	82
	Bibliografia	84
8	Apêndice A	87
8.1	Tempos do Processo Manual	87

Lista de Figuras

1.1	Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (Fonte: HARREL et al. [2000])	6
2.1	Gráfico de amostra discreta no tempo (Fonte: CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])	11
2.2	Gráfico de amostra contínua no tempo (Fonte: CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])	11
2.3	Evolução dos estados num sistema a eventos discretos (Fonte:CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])	12
2.4	Tempos e Métodos (Fonte:[SLACK et al., 2009, p 254])	13
2.5	Etapas do planeamento e controle da capacidade (Fonte:[SLACK et al., 2009, p 317])	17
2.6	Exemplo de <i>layout</i> em linha (Fonte Duarte [2003])	19
2.7	Exemplo de <i>layout</i> celular, (Fonte Duarte [2003])	20
2.8	Símbolos para representação gráfica do mapeamento de processos (Fonte Duarte [2003])	24
2.9	Gráfico de uma distribuição Normal (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 268])	27
2.10	Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 267])	28
2.11	Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 265])	29
2.12	Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 269])	30
2.13	Partes de um alto-falante	31
3.1	Fluxograma do processo	37
3.2	Gráfico Box-plot para amostra de tempos da Operação 09	41
3.3	Diagrama de Dispersão para amostra de tempos da Operação 09	41
4.1	Layout representativo da linha automática	44
4.2	Fluxograma do processo	49
4.3	Manipulador cartesiano para validação	50
4.4	Validação da secagem do adesivo	51

4.5	Validação da limpeza do entreferro	51
5.1	Sete Passos para Sucesso de um Estudo de Simulação (Fonte: LAW [2008]) . . .	56
5.2	Ambiente de Trabalho do Simul8	57
5.3	Ambiente de Simulação do Simul8	57
5.4	Modelo de Simulação manual	58
5.5	Modelo de Simulação automático	59
6.1	OP01 - Prensa do circuito magnético na carcaça	61
6.2	OP02 - Inserção da bobina e centragem	62
6.3	OP03 - Inserção da membrana	62
6.4	OP04 - Solda dos filamentos da membrana	63
6.5	OP05 - Aplicação de cola preta	63
6.6	OP06 - Aplicação de adesivo na carcaça e limpeza do GAP	63
6.7	OP07 - Montagem do equipamento móvel	64
6.8	OP08 - Prensa da borda	64
6.9	OP09 - Inserção do cone	65
6.10	OP10 - Magnetização	65
6.11	OP11 - Solda semi-automática	65
6.12	OP12 - Teste acústico	66
6.13	OA01 - Inserção do conjunto magnético na carcaça	67
6.14	OA02 - Limpeza do GAP	67
6.15	OAS01 - Inserção da bobina na giostra	67
6.16	OA03 - Inserção da centragem na giostra	68
6.17	OA04 - Aplicação de adesivo	68
6.18	OA05 - Secagem do adesivo	68
6.19	OAS02 - Inserção do bloco móvel	69
6.20	OA06 - Soldagem da centragem	69
6.21	OA07 - Inserção da malha na membrana	69
6.22	OA08 - Inserção da membrana na carcaça	70
6.23	OA09 - Soldagem da membrana	70
6.24	OA10 - Aplicação de adesivo	71
6.25	OA11 - Secagem do adesivo	71
6.26	OA12 - Posicionador dos filamentos	71
6.27	OA13 - Solda da malha	72
6.28	OAS03 - Inserção da malha no terminal	72
6.29	OAS04 - Solda da malha no terminal	72
6.30	OA14 - Inserção do coneto	73
6.31	OA15 - Aplicação de cola preta	73
6.32	OA16 - Secagem do adesivo	73
6.33	OA1 - Magnetização	74
6.34	OA18 - Teste Acústico	74
6.35	OAS05 - Aplicação de jato de tinta e identificação	74

6.36	Resumo dos tempos de operações do processo automático	75
6.37	Comparativo de modelos por números de operadores e operações automáticas . .	76
6.38	Comparativo de modelos por tempo de setup e ciclo	77
6.39	Comparativo de modelos por produção diária	78
6.40	Comparativo de modelos por tempo de atravessamento	78
8.1	Tempos - Operação Manual 01	87
8.2	Tempos - Operação Manual 02	88
8.3	Tempos - Operação Manual 03	88
8.4	Tempos - Operação Manual 04	89
8.5	Tempos - Operação Manual 05	89
8.6	Tempos - Operação Manual 06	90
8.7	Tempos - Operação Manual 07	90
8.8	Tempos - Operação Manual 08	91
8.9	Tempos - Operação Manual 09	91
8.10	Tempos - Operação Manual 10	92
8.11	Tempos - Operação Manual 11	92
8.12	Tempos - Operação Manual 12	93

Lista de Tabelas

2.1	Resumo de tempos do processo manufaturado (Fonte: CHWIF and MEDINA [2010])	26
3.1	Resumo de operação do processo manufaturado	38
3.2	Resumo de tempos do processo manufaturado	40
4.1	Resumo de operação do processo automático	47
5.1	Resumo de tempos do processo automático	60

Lista de Acrônimos e Notação

FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i> (Sistema Flexível de Manufatura)
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i> (Manufatura Integrada por Computador)
SED	Simulação a Eventos Discretos
VP	Volume de Produção
LTP	<i>Lead Time</i> de Produção
EP	Estoque de Processo
TUMO	Taxa de Utilização da Mão-de-obra
TUCT	Taxa de Utilização do Centro de Trabalho
SMED	<i>Single Minute Exchange Die and Tools</i> (Sistema de Troca Rápida de Ferramentas)
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise do Modo e Efeito de Falha)
GAP	<i>Air gap</i> - entreferro
OPxx	Operação Manual
ESxx	Estoque de Componentes
TPxx	Transporte na Esteira
TPOxx	Transporte com Operação
TPExx	Transporte Externo
DExx	Tempo de Delay
OAx	Operação Automática
OASxx	Operação Automática Supervisionada

Introdução Geral

A ideia para realização do Projeto de Conclusão de Curso surge da demanda do estágio curricular, em que foi visualizado a necessidade da empresa em questão, de aumentar sua produtividade. Durante o estágio foram estudados conceitos para melhoria do processo produtivo e percebido alguma carência na fase de projeto no que diz respeito a quantificar os benefícios e o que poderia ser melhorado. Durante esse mesmo período os conceitos foram testados, a partir de protótipos e testes de prova de vida, e a maioria deles com a aprovação do grupo. Foram criados dispositivos particulares que com toda certeza poderiam gerar outros trabalhos acadêmicos, todos englobavam uma ampla margem de conceitos do curso de Engenharia Mecatrônica.

Ao longo do estágio, a tendência era da implantação da nova linha de produção, mas outras circunstâncias não permitiram tal ação, entre elas a crise européia e um certo paradigma, ou melhor dizendo, uma cultura de grupo muito forte. Devido a esse fator, o conceito de uma linha toda automática se tornou inviável financeiramente porque seria um investimento de alto risco. A partir daí, surgiu a necessidade de outras versões de linha, que se encaixassem nos fatores técnicos, produtivos e econômicos. Em outras palavras, deveria ser uma linha com o mais baixo custo, que atendesse a demanda e aos mínimos requisitos técnicos.

Diante desse novo cenário, foram concebidas várias alternativas, visando uma linha de pensamento para atender os prazos e as metas. Entretanto, a ideia não pode ser divulgada, por questões de confidencialidade. A partir desse ponto é continuado o projeto ao comparar dois processos extremos, o manual e o automático, a fim de determinar suas reais diferenças e defender a hipótese que o processo automático é, neste caso, melhor do que o processo manual.

Para realizar o trabalho, primeiramente foi estudado todo o processo manual, mensurados todos os tempos de produção, ciclos de trabalho, cada detalhe de movimentação do operador, para determinar um modelo fielmente representativo na simulação. Após esse levantamento de dados, eles foram tratados estatisticamente, para descobrir quais eram as melhores distribuições que regiam os dados.

Paralelamente a isso, todo o processo automático foi desenvolvido, com suas peculiaridades e sempre com decisão analisando a viabilidade econômica do projeto. Todos os postos de trabalho foram sendo testados, dentro ou fora da empresa, com apoio de parceiros externos e internos. Os conceitos amadureceram e depois de várias reuniões de FMEA, para discutir os detalhes e quantificar riscos, eles foram sendo definidos e construídos. Nem todos as ideias e protótipos foram efetivamente testados, já que boa parte deles foram considerados baseados na experiência

anterior da empresa e também de empresas de projeto.

Após um conceito automático definido e todo o processo manual estudado, foi realizada a simulação computacional para averiguar o que efetivamente poderia ser melhorado no processo manual e o que ganharíamos em produtividade com um novo processo, seja ele automático ou semi-automático. Primeiramente, o modelo manual foi simulado e a primeira constatação foi que pequenas melhorias, como otimizações pontuais de postos de trabalho, não atenderiam a demanda de produção. Como foi dito, melhorias pontuais poderiam ser implantadas, mas, de fato, não iriam contribuir em nada, já que também não seria muito diferente do que a própria empresa já estava acostumada.

Ao simular o processo automático, percebemos que, de fato, ele atenderia nossa demanda de volume e que funcionaria perfeitamente, mas com uma ressalva, o seu alto valor de investimento. A solução encontrada para esse problema foi considerada ótima no que diz respeito a parte técnica, pois todas as mudanças de postos e balanceamentos que poderiam ser feitos, foram de fato alterados. Para muitos, um processo semi-automático, nessas circunstâncias econômicas e de cultura corporativa, pode ser um primeiro passo para retomar a confiança necessária para um investimento futuro.

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por finalidade discutir os principais aspectos do presente trabalho. São realizadas algumas considerações iniciais, apresentando a identificação, relevância, motivação, justificativa econômica, objetivos do trabalho e metodologia de pesquisa.

1.2 Identificação

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, "Modelagem e Simulação de Eventos Discretos como Ferramenta para Automação de Células de uma Linha de Produção Manufaturada", se encaixa no eixo de automação de processos de eventos discretos, área esta que consiste na automação da manufatura, em que se encontram os conceitos de FMS (*Flexible Manufacturing System*) e CIM (*Computer Integrated Manufacturing*).

A proposta do trabalho teve início na identificação de um problema industrial, observado durante um estágio curricular em uma empresa de autopeças, com o objetivo de elaborar conceitos e avaliar a concepção, na fase de projeto, da automação uma de linha de produção. O estudo permite ao aluno integrar vários os conceitos vistos durante o curso, para poder avaliar os cenários e tomar as melhores decisões sobre a automação do sistema e, ao final da apreciação conceber o melhor modelo de processo em ambiente industrial.

Devido questões de confidencialidade impostos pela empresa, o nome da empresa e do produto analisado será omitido, assim como, informações específicas da linha de produção que possam identificar a instituição.

1.3 Relevância

A desverticalização do processo produtivo na indústria automobilística implicou na migração de parte da produção de sistemas e subsistemas dos veículos para a indústria de autopeças. Essa migração trouxe inovações no desenvolvimento de produtos e processos, e novos padrões de qualidade. Dessa forma, [ROSÁRIO, 2005, p. 2] afirma que o estudo desses novos processos

produtivos, como é o caso da automação industrial, estão na frente de outros temas que devem ser estudados nos mais diversos segmentos da engenharia, caso queiramos um crescimento da sociedade, capaz de garantir o aumento da qualidade de vida de forma sustentável.

Visto o contexto de redução de custos e o atual mercado globalizado, muito tem se exigido das empresas no que diz respeito as respostas rápidas, e flexíveis, garantindo a qualidade do produto. Dessa maneira, o uso da simulação a eventos discretos (SED) permite que o planejamento e otimização fiquem facilitadas porque compreendem o desenvolvimento de modelos computacionais para experimentação e análise de diferentes cenários. Portanto, para um projeto de automação de célula de produção é imprescindível que se realize a simulação prévia do sistema para analisar todos os pontos críticos, possíveis panoramas de automação e viabilizar os investimentos. Para o tipo de projeto de controle de células de produção, manuais ou automatizadas, uma abordagem de controle baseado em sistemas de eventos discretos é demandada, isso devido à característica sequencial do processo de movimentação e acondicionamento de componentes e da junção das partes do produto. Em resumo, essa ferramenta é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em pontos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos, como é o caso de sistemas de manufatura.

Para BANKS [2000] o desenvolvimento de um novo sistema produtivo ou a melhoria de um já existente, passa frequentemente por tomadas de decisões em diversos níveis da organização e, geralmente, são afetadas pelo tempo disponível para a tomada de decisão, a importância da decisão, o ambiente, os riscos certezas/incertezas, os agentes decisores e os conflitos de interesses. Geralmente, quando se trabalha com automação de processos, seja por completo ou apenas de células de trabalho, surgem questões como: qual será o novo *layout*, qual será o custo do investimento, quão flexível será a linha e como obter a melhor produtividade. Essas respostas podem ser concebidas através de análises sobre crenças e ideias de um grupo de pessoas, sendo essas, pouco quantificáveis; através de modelos matemáticos estáticos que não consideram as características dinâmicas do sistema ou, através de modelos de simulação computacional dinâmico, onde são consideradas as aleatoriedades e interdependências das variáveis do sistema, prevendo o comportamento do sistema real. Para o estudo de um conceito ainda em fase de construção, KIRCHHOF et al. [2008] afirma que a simulação é de extrema importância para comprovar as diferentes configurações que o novo processo pode assumir.

1.4 Motivação

A motivação para estudar métodos matemáticos para representação, especificação, *design*, modelagem e simulação de sistemas discretos está associada à necessidade de estabelecer limites e prever o comportamento dos sistemas, notadamente os automatizados. Tal comportamento está intimamente ligado ao seu ciclo de vida e à sua utilidade, quer seja como extensão da capacidade humana de operação e transformação de objetos (manufatura), quer seja como forma de substituir completamente o elemento humano em atividades perigosas ou repetitivas, [RO-SÁRIO, 2005, p. 37].

Projetos de sistemas mecatrônicos requerem, em primeira análise, um conhecimento extremamente amplo, impondo, dessa maneira, uma formação extraordinariamente abrangente do

projetista em termos de áreas de conhecimento ou um trabalho de equipe com profissionais de formação multidisciplinar, [ROSÁRIO, 2005, p. 25].

Essa motivação, no entanto, surge no próprio estágio em que esses conceitos são discutidos. Por ser um projeto de alta complexidade, foi possível integrar ao curso de Mecatrônica, já que, de acordo com [ROSÁRIO, 2005, p. 3], projetos dessas dimensões requerem engenheiros com fortes conhecimentos, não só da base da automação industrial, mas também em relação às teorias de decisão e de organização, além de incluir conhecimentos em:

- Simplificação do sistema mecânico;
- Redução de tempo e custo de desenvolvimento;
- Facilidade de introduzir modificações ou novas capacidades;
- Flexibilidade para receber futuras modificações ou novas funcionalidades.

1.5 Justificativa Econômica

Qualquer novo projeto que necessite de altos investimentos é submetido a uma intensa análise econômica e técnica, antes de ser aprovado pelos responsáveis e, para tal, os mesmos necessitam de previsões confiáveis.

Com o objetivo de analisar quais são os fatores mais importantes no processo de decisão de investimento em robotização industrial nas empresas de autopeças brasileiras, MEDINA and CRISPIM [2010] analisaram e concluíram em seu artigo que os aspectos financeiros relacionados a custos e retorno a longo prazo são os fatores de maior importância. Aspectos como tecnologia, qualidade e produtividade associada à robotização têm uma importância secundária e, nesse sentido em relação a essa decisão, a estratégia de manufatura nas empresas de autopeças amostradas pode ser considerada subordinada à estratégia financeira, devendo a ela estar alinhada. A redução dos custos dos investimentos em automação para viabilizar projetos que necessitam quase integralmente de importação de tecnologias, também tem sido um desafio para projetistas e engenheiros que tentam atender a essas necessidades.

Nesse contexto de otimização de custos, projetos de automação de processos manufaturados podem e devem ser simulados para que se consiga determinar as melhores condições de operação e detectar erros de projeto antes da implantação, reduzindo assim os custos de projeto. Muitos de seus analistas de automação utilizam apenas planilhas do Excel, porém o grande problema é que são estáticos e determinísticos. Esses sistemas não levam em consideração o caráter dinâmico e aleatório dos sistemas automatizados, podendo gerar resultados completamente fora da realidade. Isso porque os sistemas automatizados herdam as complexidades dos manufaturados, razão direta no aumento da produtividade, porém com um alto custo de investimento. Por isso, algumas corporações só aprovam investimentos em sistemas automatizados previamente simulados, o que para alguns especialistas, os custos com simulação giram em torno de 2% a 3% do custo total de um projeto de automação, BRIGHENTI [2006]. São inúmeras as vantagens da simulação, uma delas é a procura da melhor configuração do sistema sem, no entanto, interferir

no sistema real. Além disso, é capaz de minimizar os custos de investimento em equipamentos de automação, porque a análise irá mostrar como o sistema real irá operar e não como supostamente que ele opera.

De acordo com AGUIRRE et al. [2008], com o crescimento positivo da economia, a indústria de automóveis obteve um crescimento das vendas, o que demanda um aumento na compra de autopeças. Dessa forma, para tomar vantagem da situação econômica, essas empresas foram obrigadas a aumentar e desenvolver seus processos produtivos para aumentar sua capacidade de produção.

Um ponto importante, é que, a simulação não é uma ferramenta que substitui o trabalho de interpretação humana, mas sim, uma ferramenta capaz de fornecer resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo desta maneira uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado. Para BRIGHENTI [2006], quando a simulação é aplicada no desenvolvimento de um projeto, a relação de custo e as fases do projeto é alterada. A primeira fase, de concepção do projeto, não sofre nenhum impacto, pois a aplicação da simulação é realizada após esta etapa.

Em um sistema onde é aplicada a simulação, o custo na fase de projeto fica mais elevado, mas é justamente nessa fase, com o auxílio da simulação, e que se consegue planejar um sistema mais otimizado. Consequentemente, nas fases de implantação e operação se obtém a esperada redução do custo. Pode ser observado no gráfico da Figura 1.1, que a área sobre a curva dos custos com a simulação é menor que a dos custos sem a simulação, ou seja, o custo total no final é menor quando a simulação é utilizada.

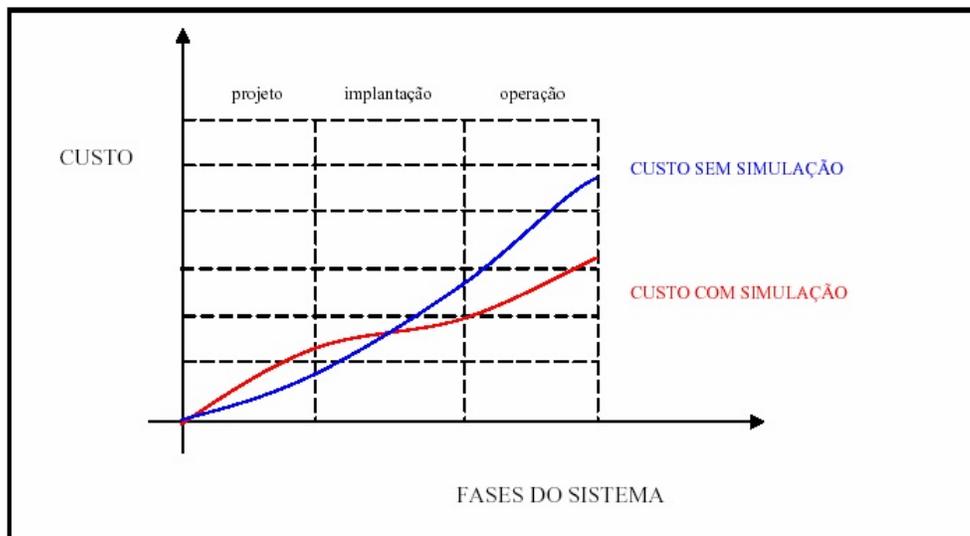


Figura 1.1: Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (Fonte: HARREL et al. [2000])

1.6 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é de utilizar a simulação de eventos discretos na fase de planejamento do projeto de automação parcial ou completa da linha de montagem, visando conceber

um aumento da produtividade e da qualidade do produto, além de uma redução de custos a longo prazo. A hipótese é que a automação sempre melhora qualquer processo, ela é verdadeira até certo ponto, no que diz respeito a qualidade, mas nem sempre essa automação completa irá aumentar a produtividade e será viável, isso porque, toda essa automação pode custar um alto investimento e não responder as expectativas de produtividade. Essa avaliação envolve todo um contexto de investimentos e análises de viabilidade para sua implantação. Dessa forma, o objetivo é chegar em um conceito que atenda aos volumes de produção e que ao mesmo tempo seja factível com os investimentos previstos.

1.6.1 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do projeto são:

- Mapear o processo da linha de produção;
- Conhecer a produtividade da linha;
- Identificar possíveis gargalos de produção;
- Propor automação;
- Definir melhor regime de operação;
- Validar modelo automatizado;
- Comparar os modelos.

1.7 Metodologia de Pesquisa

Este projeto investiga os resultados da aplicação da simulação e da otimização de uma linha de produção manufaturada. Sua otimização prevê, a priori, a implementação de uma linha de produção automática. Por esse motivo, a pesquisa não permite ao pesquisador o controle de todas as variáveis do sistema, que caracteriza uma experimentação. As pesquisas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Do ponto de vista da natureza da pesquisa, ela pode ser classificada, de acordo com [SIVLA and MENESES, 2005, p. 20], como sendo uma pesquisa aplicada, já que, tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicações práticas voltados para soluções de interesses específicos.
- Do ponto de vista da abordagem do problema, de acordo com [SIVLA and MENESES, 2005, p. 20], essa pesquisa pode ser classificada quantitativamente, ou seja, tudo pode ser quantificável, o que significa expressar em números, informações e opiniões. Para isso, requer o uso de recursos e de técnicas de estatísticas.

- Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como descritiva. De acordo com [SIVLA and MENESES, 2005, p. 21], esse tipo de pesquisa, visa descrever as principais características de um fenômeno. Para isso, envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, o que inclui observação sistemática.
- Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, ela é predominantemente um estudo de caso, valendo da experimentação através de uma simulação que envolve a análise de vários cenários. De acordo com [SIVLA and MENESES, 2005, p. 21], envolve o estudo profundo e exaustivo de poucos objetivos de maneira a permitir um amplo estudo. Este estudo se dá através da seleção de variáveis, como objeto de estudo, que permitam a análise dos efeitos que essa mesma variável produz no objeto.

A pesquisa será desenvolvida em torno da hipótese de que é viável a otimização do processo por automação, e que o automatizado é melhor, em todas as formas, do que o processo manufaturado. Para quantificar a hipótese serão feitas simulações a eventos discretos da linha de produção manual, seguindo algumas etapas. A primeira delas é o levantamento da literatura relevante para abranger toda a teoria envolvida e o que já foi pesquisado na área de interesse. Em seguida, será realizada a coleta de dados na linha de produção da empresa em estudo. Através de uma simulação, a modelagem do sistema será feita, identificando as variáveis do problema, bem como os pontos cruciais. Após a modelagem do sistema, serão implementadas as simulações a eventos discretos, em que serão analisados a produção, possíveis gargalos ou pontos críticos dos sistemas serão avaliados como correções em propostas de melhoria. A partir desse ponto, as propostas de automação serão feitas, não se esgotando o estudo no nível de programação de robôs e sistemas de visão ou detalhes específicos de mecânica e controle. Como o modelo será baseado na concepção atual da linha, possíveis erros de projeto serão corrigidos ao passo que o trabalho é desenvolvido. Por último, para avaliar os modelos, novos dados serão coletados para análise dos resultados e validação dos mesmos em novos experimentos. Pelo fato do modelo automatizado não estar implementado fisicamente, sua validação terá uma base teórica específica. Por fim, ao finalizar todas as etapas anteriores, toda a documentação necessária será organizada para redação do relatório final.

Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas de Simulação

2.1.1 Considerações Iniciais

De acordo com [CHWIF and MEDINA, 2010, p 8] os sistemas reais apresentam uma maior complexidade, devido, principalmente, ao seu comportamento dinâmico e aleatório. Contudo, com um modelo de simulação é possível replicar o sistema sendo fiel a essas características, procurando repetir virtualmente o mesmo comportamento apresentando para diferentes condições de contorno. Dessa forma, questões do tipo "What if..." são respondidas, por exemplo:

- O que ocorre se for adicionado um terceiro turno de produção?
- O que ocorre se houver um aumento de demanda em 30%?
- O que ocorre se for reduzida a equipe de trabalho de manutenção em duas pessoas?

Para [CHWIF and MEDINA, 2010, p 9], a simulação computacional pode ser dividida em três categorias básicas: simulação de Monte Carlo, simulação contínua e simulação de eventos discretos. A primeira utiliza-se de geradores de números aleatórios para analisar sistemas físicos ou matemáticos, nos quais não se considera o tempo explicitamente como uma variável. A segunda é utilizada para modelar sistemas cujo estado varia continuamente no tempo. Por fim, a terceira é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em momentos discretos no tempo, a partir de ocorrência de eventos. No caso avaliado, será utilizada a simulação de eventos discretos por se tratar de uma linha de produção manufaturada.

[CHWIF and MEDINA, 2010, p 11] listam várias áreas de aplicações da simulação, são elas:

- Aeroportos e portos;
- Bancos;
- Cadeia logística;
- Centrais de atendimento;

- Hospitais;
- Parque de diversões;
- Restaurantes;
- Supermercados;
- Militares;
- Manufatura.

A área de manufatura, depois da área militar, é o segundo maior campo de aplicação da simulação, podendo ser aplicada em vários segmentos da manufatura, tais como:

- Sistemas de movimentação - esteira transportadora;
- Linhas de montagem;
- Células automatizadas;
- Problemas de programação da produção;
- Análise de estoques.

De acordo com [BANKS et al., 2005, p 5] há algumas regras em que o uso da simulação não deve ser utilizado. A primeira delas é que a simulação não deve ser usada quando o problema pode ser resolvido em senso comum. A segunda, diz respeito a não utilizar o método quando o problema pode ser resolvido analiticamente. A terceira, diz que não é necessário simular pode-se encontrar resultados satisfatórios através de experimentos. A quarta, e última regra, trata da não utilização do método quando este ultrapassar os custos destinados ao projeto de simulação.

2.1.2 Sistemas Dinâmicos e Sistemas Estáticos

Sistemas dinâmicos são definidos por BANKS et al. [2005] como sendo um sistema, no qual seu estado seja descrito baseado em uma variável, que evolui com o decorrer do tempo. Já os Sistemas estáticos, o estado do sistema é descrito apenas para determinado momento e geralmente a variável de tempo não é importante. Além disso, o primeiro representa o sistema em qualquer tempo, diferentemente do segundo que estuda o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo.

2.1.3 Sistemas Estocásticos e Sistemas Determinísticos

De acordo com BANKS et al. [2005], os sistemas estocásticos são sistemas nos quais os valores introduzidos na simulação são aleatórios, já nos sistemas determinísticos, esses valores são constantes. Outro conceito importante é que o primeiro assume valores diversos segundo uma determinada distribuição de probabilidade. Já o segundo, assume variáveis com valores determinados.

2.1.4 Sistemas Discretos e Sistemas Contínuos

Para BANKS et al. [2005], sistemas onde o tempo de simulação é baseado na ocorrência de eventos, ou seja, avança de evento em evento, é um Sistema Discreto, Figura 2.1, diferentemente do Sistema Contínuo, que o tempo de simulação avança de forma contínua em intervalo de tempos iguais, Figura 2.2. Além disso, o primeiro envolve variáveis com valores finitos e infinitos numeráveis, já o segundo envolve variáveis que mudam constantemente com o tempo.

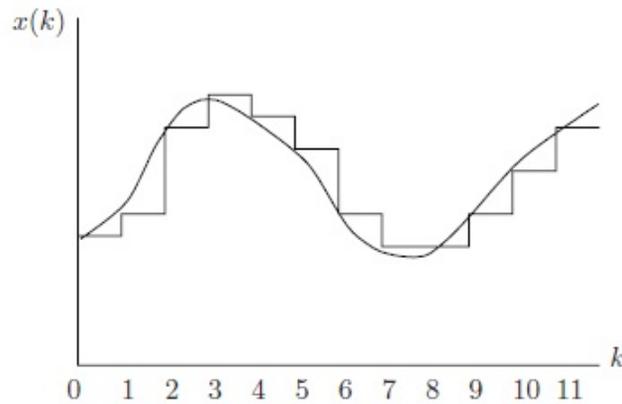


Figura 2.1: Gráfico de amostra discreta no tempo (Fonte: CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])

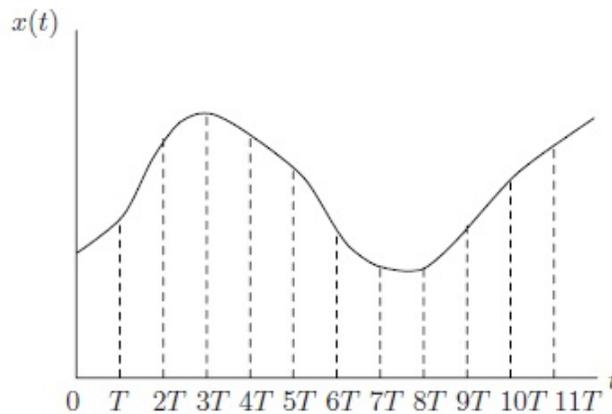


Figura 2.2: Gráfico de amostra contínua no tempo (Fonte: CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])

2.1.5 Sistemas a Eventos Discretos

Sistemas a Eventos Discretos (SED) são sistemas caracterizados por uma dinâmica definida pela ocorrência assíncrona de eventos que geram mudanças de estados discretos. O fato de os estados serem discretos significa que o conjunto de estados é contável. O conceito de evento

deve ser interpretado como um acontecimento de duração instantânea, CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008].

Exemplos de eventos podem ser: início ou término de uma tarefa (mas não sua execução), chegada de uma peça em uma máquina, etc. O estado do sistema permanece inalterado até a ocorrência de um novo evento. A Figura 2.3 mostra como se dá a evolução dos estados x_i de um sistema a eventos discretos ao longo das ocorrências dos eventos α , β e λ

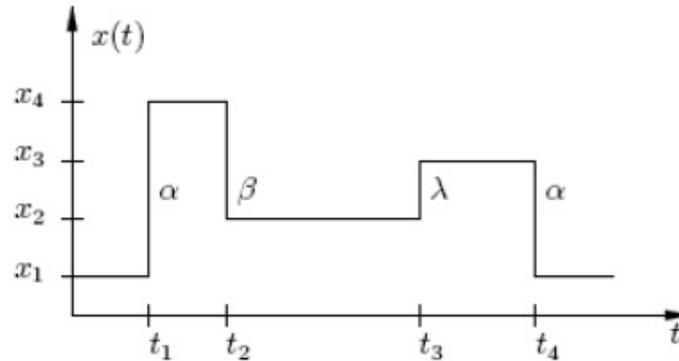


Figura 2.3: Evolução dos estados num sistema a eventos discretos (Fonte:CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008])

De acordo com CASSANDRAS and LAFORTUNE [2008], os valores de um estado podem ser calculados a partir dos valores do estado anterior, independente do intervalo de tempo passado entre os dois estados. Retomando o exemplo da chegada de uma peça a um torno: o tempo do processo de torneamento pode ser levado em conta em uma análise de sistema a evento discreto, mas o processamento em si não é considerado um evento, pois ele não causa mudança de estado no sistema. Os eventos que causam a mudança de estado no sistema são a chegada e a saída da peça, determinando se o torno está ou não disponível para operação. O tempo de processamento da peça pode ser considerado para fins de análise da operação do sistema como um todo, não sendo um fator de influência no estado seguinte do sistema.

No contexto dos SEDs, são definidos alguns elementos que os constituem:

- Entidade: objeto do interesse em um sistema (ex.: operador de máquina);
- Atributo: propriedade da entidade (ex.: tempo para a realização de uma furação);
- Atividade: ação que ocorre dentro do sistema (ex.: transporte de uma peça de uma máquina para o estoque).

2.2 Tempos e Métodos

De acordo com [SLACK et al., 2009, p 254], há dois campos de estudo de tempos separados, porém relacionados. Um, o estudo do método, concentra-se na determinação dos métodos e atividades que devem ser incluídos em trabalhos. O outro, a medida do trabalho, preocupa-se

com a medição do tempo que deve levar a execução de trabalhos. Juntos, esses dois campos são referidos como estudo do trabalho. A necessidade do estudo de um método de trabalho poderá ter origem de duas formas: implantação de um novo processo ou análise do sistema produtivo, neste caso, a última opção se enquadra melhor.

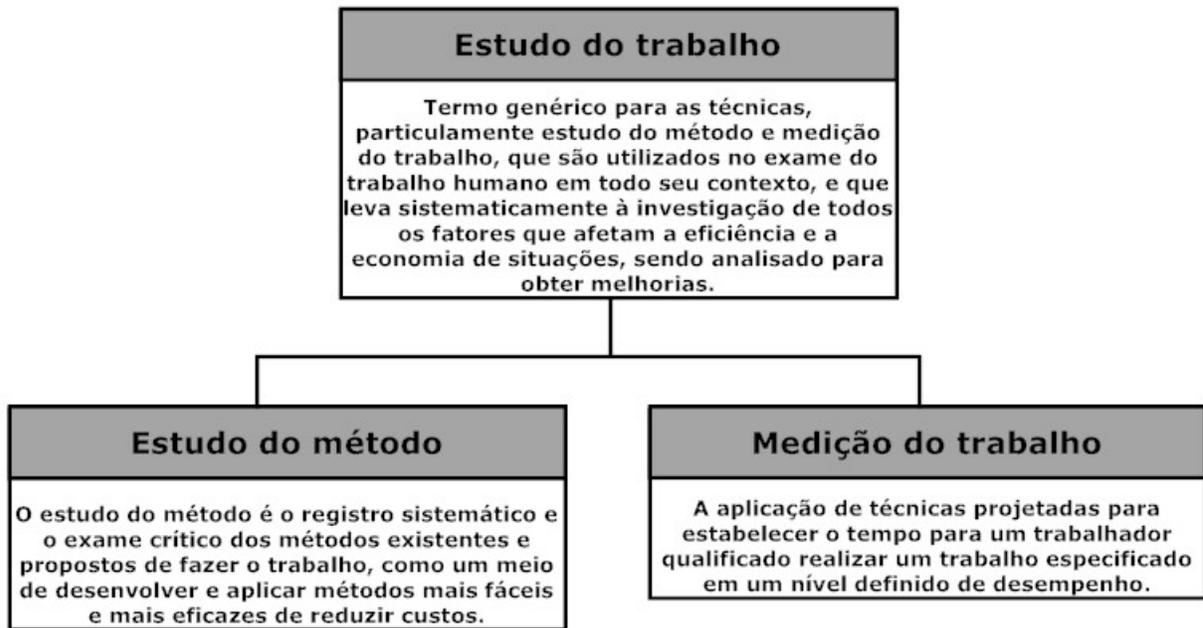


Figura 2.4: Tempos e Métodos (Fonte:[SLACK et al., 2009, p 254])

Para [SLACK et al., 2009, p 258] a medida do trabalho é o processo de definição de tempo que um trabalhador qualificado precisa para realizar um trabalho especificado, com um nível definido de desempenho. Um trabalhador qualificado é definido como aquele que possui os atributos físicos necessários, inteligência, habilidades, educação e conhecimento para desempenhar a tarefa com padrões satisfatórios de segurança, qualidade e quantidade. Já o desempenho padrão é definido como a taxa de saída que é atingida por trabalhadores qualificados sem esforço excessivo na média do dia de trabalho.

[SLACK et al., 2009, p 259] define estudo de tempo como sendo uma técnica de medida do trabalho para registrar os tempos e o ritmo de trabalho para os elementos de uma tarefa especializada, realizada sob condições especificadas. A técnica constitui-se de três etapas para obter o tempo básico para os elementos do trabalho:

1. Observar e medir o tempo necessário para realizar cada elemento do trabalho.
2. Ajustar ou normalizar cada tempo observado.
3. Calcular a média dos tempos ajustados para obter o tempo básico para o elemento.

A avaliação de ritmo dos tempos observados é definida como o processo de avaliar a velocidade de trabalho do trabalhador relativamente ao conceito do observador a respeito da velocidade correspondente ao desempenho padrão. Para registrar a avaliação do observador neste

caso foi utilizada uma escala de 100 para representar o desempenho padrão. Se um observador classificar em 100 uma observação específica do tempo para realizar um elemento de trabalho, o tempo observado é de fato o tempo que qualquer pessoa precisaria estar trabalhando.

A determinação do número adequado de cronometragens é feita através do conceito da distribuição normal (Distribuição de Gauss) com o uso do conceito de intervalo de confiança de uma média. Para determinar o número de cronometragens ou ciclos n a serem cronometrados podemos utilizar a Equação 2.1:

$$n = \left(\frac{zR}{E_r d_2 \bar{x}} \right)^2 \quad (2.1)$$

Sendo que:

- n - Número de ciclos a serem cronometrados.
- z - Coeficiente da distribuição normal padrão para uma probabilidade determinada.
- R - Amplitude da amostra (diferença entre o valor máximo e mínimo).
- E_r - Erro relativo praticado na análise, variando entre 5% e 10%. É um dado pré-determinado.
- d_2 - Coeficiente em função do número de cronometragens realizadas preliminarmente.
- \bar{x} - Média dos valores observados na amostra de tempos.

Para a utilização da Equação 2.1, deve-se realizar uma cronometragem prévia, cronometrando-se a operação entre cinco e sete vezes e obter dos resultados, a média e a amplitude. Devem também ser fixados os valores da probabilidade e do erro relativo que são desejados. Na prática, costuma-se utilizar probabilidade entre 90% e 95%, e erro relativo variando entre 5% e 10%. O valor do z é tabelado e para uma probabilidade de 95% o seu valor é de 1,96. O coeficiente d_2 está associado ao número preliminar de cronometragens realizadas, para um número de 10 amostras seu valor é de 3,078.

2.3 Medidas de Desempenho de um Sistema de Manufatura

2.3.1 Considerações Iniciais

Para [SLACK et al., 2009, p 40] são cinco os objetivos de desempenho de um processo de produção que impactam no projeto do mesmo:

1. Qualidade: o papel dos projetistas é oferecer um processo livre de erros, com recursos adequados, capazes de oferecer e atender as especificações do produto, dentro das limitações do processo. Para o cliente, isso resulta em produtos conformes e com menores taxas de refugo.

2. Rapidez: o objetivo do processo automático também é de ter um tempo de atravessamento mínimo e uma taxa de *output* adequada aos níveis de demanda do mercado, atendendo a flexibilidade da mesma. Isso gera um baixo volume de estoque e um curto tempo de espera do cliente.
3. Confiabilidade: é necessário que o processo atenda ao volume e programação de *output*, através de recursos de processos confiáveis. Os resultados são entregas pontuais dos produtos, menores interrupções e reprogramações do processo.
4. Flexibilidade: ponto fundamental do processo, que deve se modificar de maneira simples entre estados e ser capaz de produzir diferentes produtos, conforme requisitos, em um tempo de *setup* mínimo. Isso é de extrema importância, pois permite uma alteração rápida e de baixo custo de tempos e volumes, possibilitando uma habilidade de processar uma ampla variedade de produtos e ao mesmo tempo lidar com eventos não programados, como por exemplo, um pico na demanda gerado por planos de ações governamentais.
5. Custo: a redução de custos é um dos pontos chaves, porque permite eliminar desperdícios em termos de capacidade excessiva, atraso no processo, erros do processo e principalmente redução do número de operadores, que, atrelados a eles, geram treinamentos especiais, encargos sociais, além de possuírem uma variedade muito grande de ritmo de produção, o que afeta o tempo de atravessamento.

2.3.2 Volume de Produção

Volume de produção (VP) é dado pela razão entre a quantidade produzida e a quantidade vendida. Se o volume de produção for maior que 1, isso significa que estoques desnecessários estão sendo criados, aumentando os custos que não agregam valor ao produto. Se o volume de produção for menor que 1, isso significa que a demanda não está sendo atendida, [SLACK et al., 2009, p 321].

2.3.3 Lead Time de Produção

Lead time de produção (LTP) é o intervalo de tempo entre o recebimento de um pedido e a entrega da respectiva encomenda ao cliente. Indica a velocidade de resposta ao mercado e também a flexibilidade do sistema, [SLACK et al., 2009, p 91].

2.3.4 Estoque de Processo

Estoque em processo (EP) é o estoque que percorre o fluxo de materiais no sistema. Quanto maior o estoque em processo, maiores serão os custos diretos e indiretos agregados ao produto final, [SLACK et al., 2009, p 360].

2.3.5 Taxa de Utilização do Centro de Trabalho e de Mão-de-obra

A Taxa de utilização do centro de trabalho (TUCT) é porcentagem em tempo em que um centro de trabalho esteve em operação e a Taxa de utilização de mão-de-obra (TUMO) é

razão entre as horas totais trabalhadas e a produção no período. O aumento da produção num determinado período, a utilização de uma equipe menor para a mesma demanda ou um tempo menor de produção levam a uma redução da TUMO.

2.3.6 Eficácia

Eficácia é a realização efetiva das coisas certas pontualmente e dentro dos requisitos especificados, a eficácia está relacionada com a performance do sistema. Uma medida formal para eficácia pode ser estabelecida pela relação entre a saída obtida e a saída esperada, Equação 2.2, [SLACK et al., 2009, p 323].

$$\varepsilon = \frac{\textit{saida obtida}}{\textit{saida esperada}} \quad (2.2)$$

2.3.7 Eficiência

Conforme propõem [SLACK et al., 2009, p 108] uma definição para eficiência pode ser dada pela relação entre o consumo previsto e o consumo realizado, Equação 2.3.

$$\xi = \frac{\textit{consumo previsto}}{\textit{consumo real}} \quad (2.3)$$

2.3.8 Capacidade

De acordo com [SLACK et al., 2009, p 315] "a definição da capacidade de uma operação é o máximo nível de atividade de valor adicionado em determinado período de tempo, que o processo pode realizar sob condições normais de operação". O planejamento da capacidade deverá ser realizado no longo, médio e curto prazo. Sendo o planejamento de longo prazo realizado com um horizonte de três a cinco anos, normalmente utilizando dimensionamento de uma nova instalação ou como planejamento estratégico, e o planejamento de médio e curto prazo com um horizonte de 2 a 18 meses servindo como ferramenta de administração do dia a dia do gerente de produção em função da demanda. Segundo o mesmo autor, com o foco no planejamento de médio e curto prazo os gestores da produção precisam tomar decisões nas suas políticas de capacidade que afetarão diversos aspectos de desempenho:

- os custos serão afetados pelo equilíbrio entre capacidade e demanda, ou seja, caso a demanda for menor que a capacidade disponível o custo unitário aumentará;
- as receitas também serão afetadas, mas de maneira inversa, pois com capacidade ociosa há garantia de atendimento a demanda;
- o capital de giro será afetado se o gerente decidir produzir para estocar, visando não ter capacidade ociosa;
- a qualidade também será afetada pelo planejamento da capacidade, pois se na empresa estiver com uma capacidade de mão-de-obra inferior à necessidade da demanda, haverá a necessidade contratar novos funcionários e o risco de produzir peças defeituosas aumentará;

- a velocidade de resposta (flexibilidade) a mudança de demanda do cliente;
- a confiabilidade de entrega poderá ser afetada caso a capacidade esteja muito próxima à demanda porque, por exemplo, uma máquina poderá quebrar e a empresa não terá tempo para recuperar o tempo parado.

A sequência de decisões no planejamento e controle da capacidade a serem tomadas pelos gestores da produção, envolve três etapas, ilustradas na Figura 2.5.

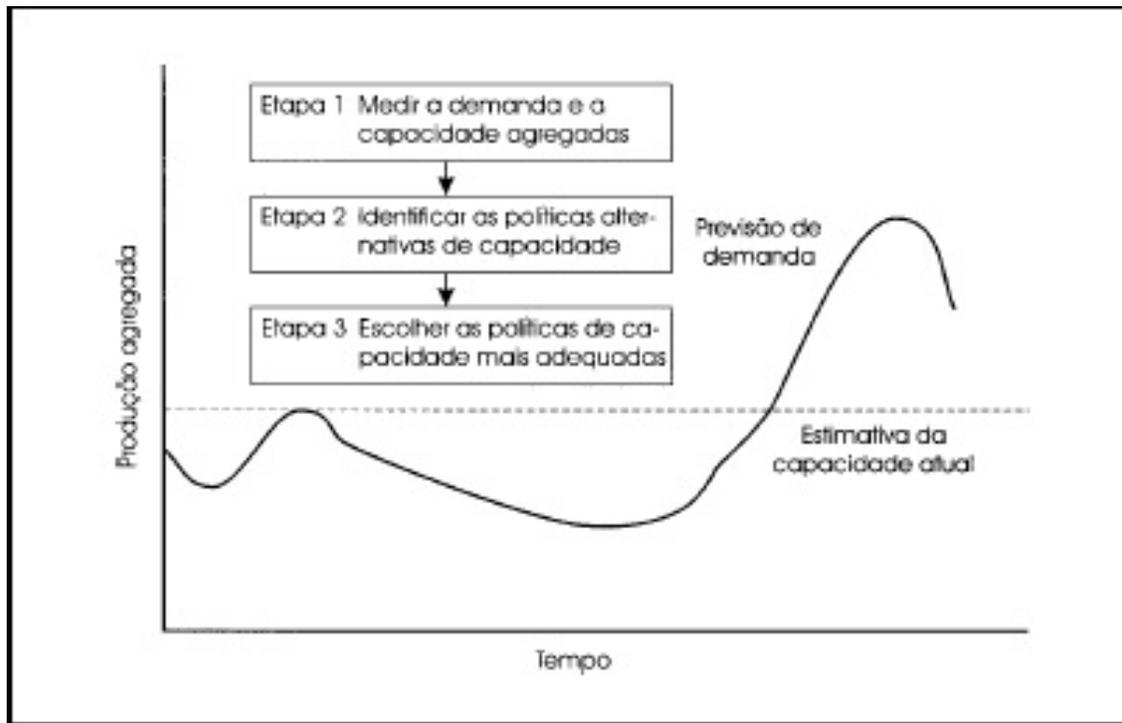


Figura 2.5: Etapas do planejamento e controle da capacidade (Fonte:[SLACK et al., 2009, p 317])

A primeira etapa do planejamento consiste em entender e medir a demanda visando prever possíveis flutuações e o grau de capacidade disponível na organização para absorver estas flutuações. O tipo mais comum de flutuação é a sazonalidade do consumo, como por exemplo: na indústria alimentícia durante o verão aumenta-se a venda de maionese diminuindo a venda de sopas e no inverno ocorre o inverso. A segunda etapa do planejamento consiste em identificar as estratégias para lidar com esta flutuação da demanda, adotando uma das três estratégias básicas ou puras como chamou [SLACK et al., 2009, p 317]: ignorar a flutuação e manter o programa de produção, ajustar a capacidade à demanda ou ajustar a demanda à capacidade. Normalmente o gestor usa uma combinação das três estratégias visando o menor impacto econômico. A terceira etapa do planejamento é escolher qual a abordagem mais eficaz para a situação vivida no momento, pois uma solução adotada no passado pode não ser a mais correta para nova situação. O mesmo autor recomenda duas técnicas no auxílio à decisão: as representações acumuladas, que permitem comparar a demanda e a capacidade quanto à viabilidade.

Determinar a capacidade produtiva de uma operação, célula ou planta não é um problema trivial, pois cada elemento possui características que alteram a sua capacidade [SLACK et al.,

2009, p 321], por exemplo, em uma máquina depende do seu estado de conservação, do mix de produção, do método de trabalho, do operador, do setup, da marca da ferramenta de corte, etc. Segundo o mesmo autor em operações de alto volume, repetitivas, de baixa variabilidade, as medidas de capacidade de produção são frequentemente baseadas nos recursos de entrada necessários e porque as vendas são definidas em termos do volume de produção e nas operações complexas que produzem uma ampla variedade de itens.

2.3.9 Produtividade

Segundo SLACK et al. [2009], a produtividade relaciona os resultados gerados pelo sistema organizacional com os recursos necessários para gerá-los. Um outro conceito é que a produtividade de um recurso é a quantidade de produtos ou serviços produzidos num intervalo de tempo dividido pela quantidade necessária desse recurso e ainda, segundo os autores, as variáveis como capital, material e mão de obra direta podem ser usadas para medir e determinar a produtividade em um intervalo de tempo. Dessa forma, podemos dividir a produtividade em prevista (p_p) e efetiva (p_e), sendo que pode ser expressa, por exemplo: em peças/homem hora, tempo planejado/capacidade produtiva, faturamento/homem ou específico para um determinado setor, Equações 2.4 e 2.5:

$$p_p = \frac{\textit{saida prevista}}{\textit{consumo previsto de recursos}} \quad (2.4)$$

$$p_e = \frac{\textit{saida efetiva}}{\textit{consumo efetivo de recursos}} \quad (2.5)$$

2.4 Sistemas de Manufatura

2.4.1 Layout

A distribuição e o arranjo de áreas de trabalhos iniciou-se com o comércio de forma intuitiva e com o desenvolvimento do sistema produtivo, maior atenção passou a ser dada à utilização do espaço. Esta atenção ao planejamento na utilização das áreas deve-se aos engenheiros químicos e de mineração alemã, a indústria de embutidos de carne em Chicago, a produtores de automóveis e a armadores britânicos. Com os estudos de Taylor, Barnes, Maynard, casal Gilbreth e de outros contemporâneos, o mero arranjo físico intuitivo passou a ter uma série de conceitos e técnicas de visualização de processos que permitiram a sua evolução para uma área de estudos com corpo próprio, SLACK et al. [2009].

O arranjo físico ou *layout* assumiu um papel de fundamental importância no processo produtivo, principalmente com as novas exigências de respostas rápidas do mercado globalizado. Um bom arranjo físico é de grande importância, tanto para redução de espaço físico na planta da indústria, quanto para redução de deslocamento de matéria-prima entre postos ou linhas de produção.

As técnicas de estudo do *layout* evoluíram nas últimas décadas, saindo do estágio intuitivo, uso de ferramentas simples de cálculo e do bom senso dos projetistas, para o uso de sofisticadas

técnicas de programação matemática e simulação. O mesmo autor classifica o *layout* em quatro tipos principais de arranjo: arranjo físico funcional, arranjo físico em linha, arranjo físico de posição fixa e arranjo físico de processo contínuo.

O *layout* funcional ou por processos caracteriza-se pelo agrupamento das máquinas por tipo ou função, por exemplo: seção de tornos, seção de fresadoras e seção de fornos. Esse tipo de *layout* é mais aplicável quando o volume de produção é baixo e existe uma grande diversificação de tipos de produtos. O *layout* de processo contínuo o produto literalmente flui pelos equipamentos, pois são líquidos, pós ou gasosos, como por exemplo, o encontrado em refinarias e indústria alimentícia. Já o *layout* do tipo posicional ou fixo é um tipo de arranjo para empresas de fabricação de bens sob encomenda, geralmente com o produto sendo de grandes dimensões como navios e aviões. Neste tipo de arranjo são os equipamentos, matéria prima e a mão-de-obra que se movem até o produto. Esses tipos de *layouts* não se aplicam ao nosso objeto de estudo. Porém, os que podem ser aplicados são os *layouts* de linha e o celular.

O *layout* de linha é caracterizado por grandes lotes de produção e máquinas para fins específicos. Possui menor variabilidade de produtos e maior mecanização. Normalmente as máquinas são dispostas na forma de linhas obedecendo à sequência do processo do produto, Figura 2.6. As vantagens desse tipo de *layout* são: grande capacidade de produção, baixo tempo de espera entre operações, alto grau de automação e baixo nível de perdas com transportes, normalmente automatizados; e as desvantagens são: alto valor de investimento e baixa flexibilidade para a incorporação de novos produtos. Como exemplo de aplicação desse tipo de *layout* temos as linhas de montagem de automóveis e o próprio objeto de estudo.

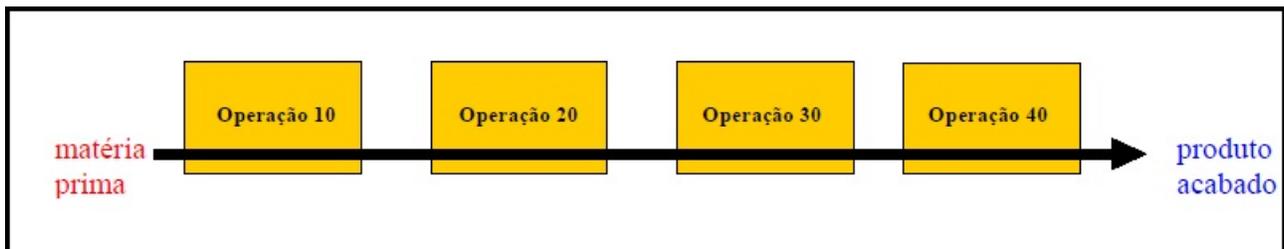


Figura 2.6: Exemplo de *layout* em linha (Fonte Duarte [2003])

Este tipo de arranjo físico, pode ser considerado como uma tentativa de conseguir a eficiência do *layout* por processo e ao mesmo tempo a flexibilidade para a produção de um mix de produtos semelhantes. SLACK et al. [2009] define o arranjo físico celular como um tipo de *layout* com o objetivo de montar mini-fábricas para diferentes famílias de produtos. O *layout* celular está baseado na aplicação da tecnologia de grupo, que é uma estratégia de manufatura que identifica similaridades entre os produtos a serem fabricados, agrupando-os em famílias de produtos. O *layout* celular possui as seguintes características: agrupamento das máquinas normalmente na forma de "U", Figura 2.7, produção em lotes, produção de um mix de produtos, disposição das máquinas de forma a permitir que um operador controle mais de uma máquina, fluxo de material mais organizado e melhor nível de qualidade.

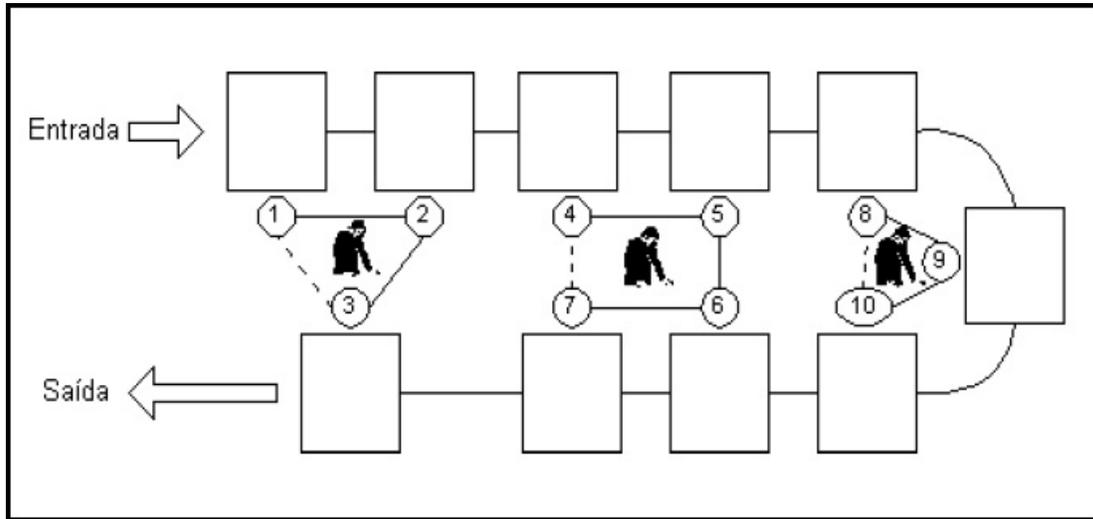


Figura 2.7: Exemplo de *layout* celular, (Fonte Duarte [2003])

2.4.2 Balanceamento de Linhas

O balanceamento de uma linha de produção ou montagem é de fundamental importância para a empresa não perder eficiência, produtividade, oportunidades de vendas ou em resumo não perder dinheiro. Segundo SLACK et al. [2009], o balanceamento de linha como um campo de estudos surgiu 41 anos após a construção da linha do Ford T e o termo balanceamento conceitualmente está ligado ao projeto de linha e aos estudos efetuados após o projeto e implementação são rebalanceamentos de linha ligados a sua operação. O problema de balanceamento de linha consiste em harmonizar todas as atividades ligadas ao processo produtivo, focando o processo de uma forma macro (desde a entrada da matéria prima até a expedição do produto acabado) ou de uma forma micro (exemplo: uma célula de manufatura ou um setor de montagem) de modo que o tempo de processamento de cada estação posto ou célula de trabalho seja aproximadamente o mesmo, permitindo a produção fluir no mesmo ritmo entre as estações sem provocar estoques intermediários, [SLACK et al., 2009, p 207].

O ponto de partida para o balanceamento, é o levantamento das informações básicas relativas ao processo, sendo: o roteiro de fabricação e/ou montagem do produto, os tempos padrões de cada operação, o programa de produção real ou esperado e a jornada de trabalho

Cálculo do ritmo de produção ou taxa de produção, dado pela Equação 2.6:

$$ritmo = \frac{Q}{J} [produto/hora] \quad (2.6)$$

Em que:

- Q = Quantidade diária de produção;
- J = Jornada de trabalho diária.

Cálculo do tempo total de trabalho no posto, dado pela Equação 2.7:

$$T_{tt} = \sum_{j=1}^n t_{p_j} \quad (2.7)$$

Em que:

- T_{tt} = Tempo total de trabalho no posto;
- t_p = Tempo de trabalho de cada elemento do posto;
- n = número de elementos de trabalho.

Fator de balanceamento, Equação 2.8:

$$F_b = \frac{J}{Q} = \frac{1}{\text{ritmo}} \quad (2.8)$$

Número de postos de trabalho, Equação 2.9:

$$n_p = \frac{T_{tt}}{F_b} \quad (2.9)$$

Número de pessoas, Equação 2.10:

$$n_{\text{pessoas}} = \frac{\text{ritmo} \times Q}{\text{tempo de trabalho por dia por pessoa}} \quad (2.10)$$

O cálculo do número de pessoas poderá sofrer variações em função do *layout* adotado, grau de automação da linha e características particulares do produto. Como já exposto, a identificação e a correção do recurso gargalo no processo produtivo é de suma importância para o escoamento contínuo da produção. SLACK et al. [2009] aborda o gerenciamento do gargalo de maneira clara com uma sequência específica para a análise sobre o processo gargalo, descrita a seguir:

- identificar os componentes do *lead time* da linha;
- eliminar os elementos que não agregam valor;
- minimizar os elementos que não agregam valor, mas são necessários;
- reavaliar o método de trabalho da parcela produtiva.

Um outro aspecto importante sobre o gargalo, é a sua transitoriedade ou mudança de localização dentro do fluxo produtivo. Isto poderá ocorrer quando se produz não um único produto, mas sim um mix de produtos, em que podem ocorrer diferenças entre os tempos padrões de um produto A para um produto B no mesmo posto de trabalho ou devido a introdução ou retirada de produção de um produto ou por alterações de processo. No gerenciamento do gargalo deve-se adotar algumas ações: a sua eliminação, por exemplo, com a compra de um outro equipamento igual ao equipamento gargalo para trabalhar em paralelo. Se esta medida for muito dispendiosa para a empresa, naquele momento, pode-se atenuar os efeitos do gargalo com medidas administrativas: como exemplo, evitar a falta de produto (porosidade no sistema) na máquina gargalo, a equipe de manutenção deverá estar sempre disponível para atuação nesta máquina e manter itens de reparo sempre em estoque, desenvolver dispositivos de troca rápida de ferramentas - TRF (SMED - Single Minute Exchange Die and Tools) e também de carga /descarga ou terceirizar parte da produção.

2.4.3 Setup

Nos sistemas de fabricação, quando ocorre a mudança de um produto A em fabricação para um outro produto B, é necessário fazer a troca de ferramentas e/ou ajustes na máquina, este tempo necessário ao início da nova produção é chamado de tempo de setup, SHALLER [2000]. Em um sistema de produção é comum a fabricação ou a montagem de no mínimo dois produtos distintos e existindo sistemas onde o número de itens ativos podem chegar a mais de 9.000 e as ordens de fabricação, por exemplo, podem ser em média de 2.000 por mês. O tempo de *setup* deverá ser minimizado ao máximo possível, porque é um tempo que não agrega valor ao processo e a empresa tendo 2.000 ordens de produção mensal terá também 2.000 *setups* que somente agregarão tempo ao *lead time*. Segundo o mesmo autor, se o tempo de *setup* for alto inviabiliza a produção de lotes menores e a agilidade de resposta do sistema às necessidades do cliente. Segundo o mesmo autor, o *setup* deverá ser reduzido aplicando-se a técnica do sistema de troca rápida de ferramentas - TRF (SMED - Single Minute Exchange Die and Tools) permitindo um ganho no tempo de preparação e com isto possibilitar a redução do tamanho dos lotes de fabricação.

Na busca da redução do tempo de *setup* diversos autores têm desenvolvido técnicas ou metodologias visando atingir esse objetivo, como exemplo pode-se citar: SHALLER [2000] trata do problema do *setup* em células de manufatura e sua influência na programação da produção em lotes abordando a necessidade do sequenciamento da produção, através de um algoritmo heurístico de permutação, fazendo o aproveitamento do *setup* entre um lote A que terminou a sua fabricação na célula e o lote B que iniciará sua produção.

2.4.4 Método de Formação de Células

O problema de formação de célula consiste em determinar, com base em um conjunto de informações, células de processamento interdependentes, que minimizam a movimentação intercelular, TAHARA et al. [1997]. Para o mesmo autor, as informações necessárias para a determinação das células de manufatura, podem ser: número, tipo e capacidade das máquinas de produção; números e tipos de peças a serem manufaturadas; as rotas das peças e as máquinas que processam cada peça.

Entretanto, YASUDA and YIN [2001] afirmam que um ponto vital para a fase de formação das células de manufatura é a capacidade de levar em conta às peculiaridades do processo de produção de cada organização que decidir implementar a manufatura celular. Deste modo, existem diversos métodos, que consideram alguns fatores para a formação de uma célula de acordo com as vantagens e necessidades que se deseja obter ao optar pela manufatura celular.

Alguns fatores utilizados para a decisão no processo de formação de célula são enumerados, sendo os fatores apontados: volume de produção, variedade de produtos, rota dos produtos durante o processamento, tempo de processamento, tempo de *setup* e as restrições existentes em cada organização. O mesmo autor salienta que as informações a respeito do custo envolvido na implementação e operação do sistema celular de manufatura devem ser consideradas não só para verificar a disponibilidade de recursos da organização para implementar o sistema celular, mas principalmente para ser um ponto de referência na avaliação de performance do sistema e

sua melhoria contínua.

2.4.5 Capabilidade do Processo

De acordo com [SLACK et al., 2009, p 537] a capabilidade do processo é a medida da aceitabilidade da variação do processo. A medida mais simples de capacidade (C_p) é dada pela razão entre a faixa de especificação e a variação natural do processo (isto é, ± 3 desvio padrão), Equação 2.11:

$$C_p = \frac{LST - LIT}{6s} \quad (2.11)$$

Em que:

- LST = limite superior de tolerância;
- LIT = limite inferior de tolerância;
- s = desvio-padrão da variabilidade do processo.

Geralmente, se a C_p de um processo é maior do que 1, considera-se que o processo é capaz, e se a C_p é menor do que 1, indica que o processo não é capaz, pressupondo uma distribuição normal. A simples medida da capabilidade pressupõe que a média da variação do processo está no ponto médio da faixa de especificação. Frequentemente, todavia, a média do processo é baseada em relação à faixa de especificação.

2.5 Mapeamento de Processo

De acordo com [SLACK et al., 2009, p 102], mapeamento de processo envolve simplesmente a descrição de processo em termos de como as atividades se relacionam uma com as outras dentro do processo. O mapeamento envolve ainda uma ordenação específica das atividades de trabalho no tempo e no espaço, com um começo e fim identificados, assim como os inputs e *outputs*. Para isso, existem muitas técnicas que podem ser usadas para mapeamento de processo ou análise de processo. O mapeamento de processo consiste em identificar, documentar, analisar e desenvolver um plano de melhoria que proporcione a mudança de visão dos gestores de indústrias, ou seja, faz com que diminua o foco nos *output* ou produtos e fortaleça a gestão dos processos.

Segundo VILLELA [2000], os processos seguem uma hierarquia e podem ser divididos da seguinte forma:

- Macroprocesso: Processo que envolve mais de uma função na estrutura organizacional, e a sua operação tem um impacto significativo no modo como a organização funciona;
- Processo: Conjunto de atividades sequenciais (conectadas), relacionadas e lógicas que tomam um *input* do fornecedor, acrescentam valor e entregam um *output* para um cliente;

- Subprocessos: Uma parte interrelacionada de forma lógica com outro subprocesso, realizando um objetivo específico em apoio ao macroprocesso e contribui para o objetivo deste;
- Atividades: São elementos do processo ou subprocesso. Geralmente são desempenhadas por uma unidade (pessoa ou departamento) para produzir um determinado resultado.

O mapeamento de processo consiste em identificar, documentar, analisar e desenvolver um plano de melhoria que proporcione a mudança de visão dos gestores de indústrias, ou seja, faça com que diminua o foco nos *outputs* ou produtos e fortaleça a gestão dos processos. O resultado do mapeamento do processo, geralmente, é uma representação gráfica, o qual mostra como os recursos de entrada são processados e transformados em saídas, destacando-se a relação e a conexão entre cada atividade. Os símbolos de mapeamento de processo são usados para classificar os diferentes tipos de atividades. Embora não exista um conjunto universal de símbolos utilizados em todo o mundo para um tipo de processo, existem alguns que são comumente usados. Os símbolos estão representados e descritos na Figura 2.8. Uma vantagem significativa de mapeamento de processos é que cada atividade pode ser sistematicamente colocada em cheque como tentativa de aprimorar o processo. A partir desses símbolos, são criados os gráficos de processo em fluxo para processamento das informações.

Símbolos	Descrição
	Operação manual/automática
	Estoque de material
	Transporte com ou sem operação
	Repouso/Espera
	Inspeção/Teste

Figura 2.8: Símbolos para representação gráfica do mapeamento de processos (Fonte Duarte [2003])

2.6 Estatística

2.6.1 Estatística Descritiva

[MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 120] definem média como sendo o valor médio de todas as observações do conjunto de dados. Geralmente, esses dados representam uma amostra

de observações que foram selecionadas a partir de alguma população maior de observações. Se as n observações em uma amostra forem denotadas por x_1, x_2, \dots, x_n , então a média da amostra será dada pela Equação 2.12:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.12)$$

Embora a média da amostra seja útil, ela não transmite toda a informação acerca de uma amostra de dados, [MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 120]. A variabilidade ou dispersão nos dados pode ser descrita pela variância da amostra ou pelo desvio-padrão da amostra. Se x_1, x_2, \dots, x_n for uma amostra de n observações, então a variância da amostras é dada pela Equação 2.13:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.13)$$

O desvio-padrão da amostra, s , é a raiz quadrada positiva da variância da amostra, dado pela Equação 2.14:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.14)$$

Além da variância e do desvio-padrão da amostra, a amplitude da amostra, ou a diferença entre a maior e a menor observação, é uma medida útil de variabilidade, [MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 121]. Se as n observações em uma amostra forem denotadas por x_1, x_2, \dots, x_n , então a amplitude da amostra é dada pela Equação 2.15:

$$r = \max(x_i) - \min(x_i) \quad (2.15)$$

[MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 124] definem ainda outras duas medidas importantes: a mediana e a moda. A primeira é definida como uma média de tendência central, que divide os dados em duas partes iguais, metade abaixo da mediana e metade acima. Se o número de observações for par, a mediana estará na metade da distância entre os dois valores centrais. Se o número de observações for ímpar, a mediana será o valor central. A segunda, a moda, é definida como o valor de observação que ocorre com maior frequência.

2.6.2 *P-value*

De acordo com [CHWIF and MEDINA, 2010, p 42] o processo de modelagem de dados termina com algum teste estatístico para determinar se o modelo probabilístico selecionado tem ou não aderência ao conjunto de dados observados. Escolhe-se um certo nível de significância e, se o valor obtido da amostra for menor do que um valor crítico tabelado, então a hipótese não é rejeitada. Contudo, o *software* utilizado para análise dos dados fornece um certo valor,

Valor	Critério
$p\text{-value} < 0,01$	Evidência forte contra a hipótese de aderência
$0,01 \leq p\text{-value} < 0,05$	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
$0,05 \leq p\text{-value} < 0,10$	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
$0,10 \leq p\text{-value}$	Evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência

Tabela 2.1: Resumo de tempos do processo manufaturado (Fonte: CHWIF and MEDINA [2010])

denominado $p\text{-value}$, a partir do qual são tomadas as decisões de rejeição ou não da hipótese de aderência. O $p\text{-value}$, ou nível descritivo, representa o menor nível de significância que pode ser assumido para se rejeitar a hipótese de aderência, ou seja:

- Se $p\text{-value} \leq \alpha$, H_0 é rejeitada ao nível de significância α .
- Se $p\text{-value} > \alpha$, H_0 não é rejeitada ao nível de significância α .

Portanto, quanto menor o $p\text{-value}$, mais razões temos para rejeitar a hipótese de aderência. A Tabela 2.1 apresenta as faixas de valores trabalhadas.

2.7 Distribuições Estatísticas

2.7.1 Distribuição Normal

De acordo com [MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 73] toda vez que um experimento aleatório for replicado, a variável aleatória que for igual ao resultado médio (ou total) das réplicas tenderá a ter uma distribuição normal, à medida que o número de réplicas se torne grande. Por isso, esse modelo é mais amplamente utilizado para a distribuição de uma variável aleatória. Assim, temos o seguinte resumo e o gráfico representado pela Figura 2.9, [CHWIF and MEDINA, 2010, p 268], da distribuição normal:

- Parâmetros: σ^2 : variância e μ : média; número positivo real.
- Domínio: $0 \leq x < +\infty$.
- Função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{ para todo } x \in \mathbb{R} \quad (2.16)$$

- Média: μ .
- Variância: σ^2 .
- Aplicações: modelam situações em que a distribuição de processo envolvido pode ser considerada como a soma de um conjunto de processos componentes. Por exemplo, o tempo execução de uma operação, que é a soma dos tempos de execução de etapas da operação.

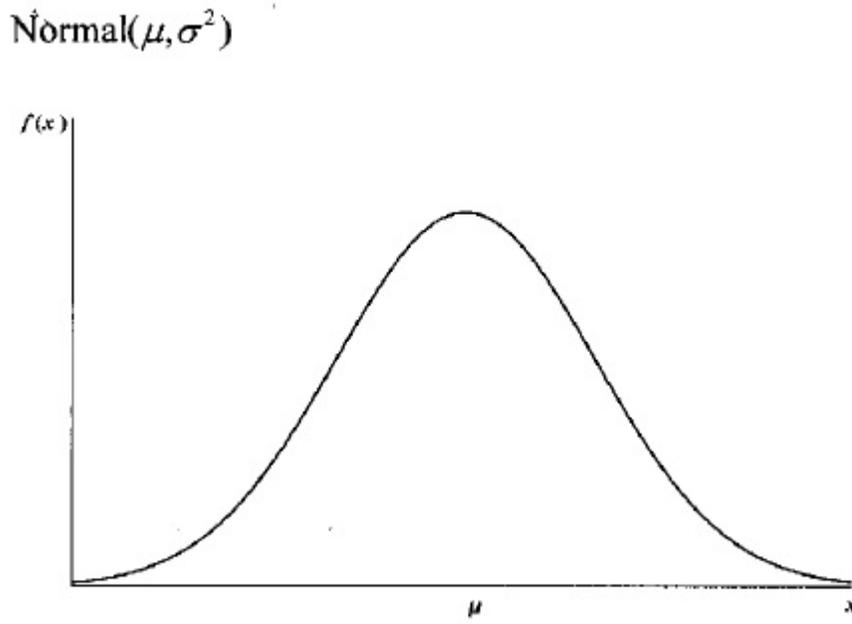


Figura 2.9: Gráfico de uma distribuição Normal (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 268])

2.7.2 Distribuição Lognormal

- Parâmetros: μ : parâmetro de escala ou de posição, e σ : parâmetro de forma ou de dispersão; números positivos reais.
- Domínio: $0 \leq x < +\infty$
- Função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{para } x > 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.17)$$

- Média:

$$e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad (2.18)$$

- Variância:

$$e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (2.19)$$

- Aplicações mais comuns: Modelam situações em que a distribuição do processo envolvido pode ser considerada como a multiplicação de um conjunto de processos componentes. Se uma variável aleatória X tem distribuição lognormal com parâmetros μ e σ , então, $\ln(X)$ tem uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ . Note que μ e σ não são a média e o desvio padrão de X , mas a média e o desvio padrão de $\ln(X)$, pelo gráfico da Figura 2.10.

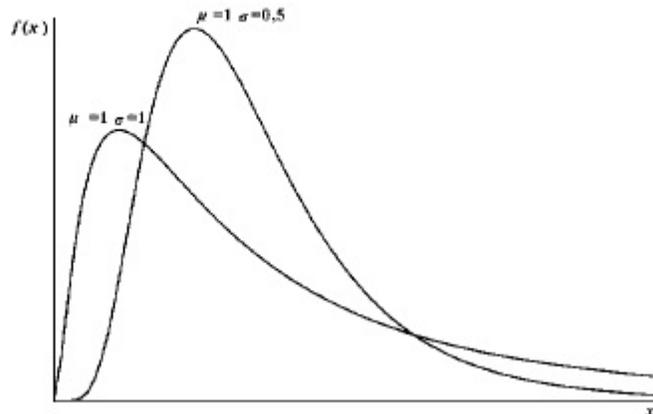
Lognormal(μ, σ^2)

Figura 2.10: Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 267])

2.7.3 Distribuição Exponencial

- Parâmetros: λ : taxa de ocorrências.
- Domínio: $x \geq 0$
- Função densidade de probabilidade, Equação ??:

$$f(x) = \begin{cases} e^{-\lambda x} & \text{para } x \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.20)$$

- Média:

$$\frac{1}{\lambda} \quad (2.21)$$
- Variância
- Aplicações mais comuns: Modelam os tempos entre ocorrências sucessivas de eventos ou a duração do evento. Se o tempo entre ocorrências sucessivas de um evento é exponencialmente distribuído, então, o número de eventos que ocorrem em um certo intervalo de tempo é um processo de Poisson. O gráfico da Figura 2.11 representa a distribuição.

2.7.4 Distribuição Uniforme

- Parâmetros: a : menor valor e b : maior valor são números reais, tais que $a < b$.
- Domínio: $a \leq x \leq b$

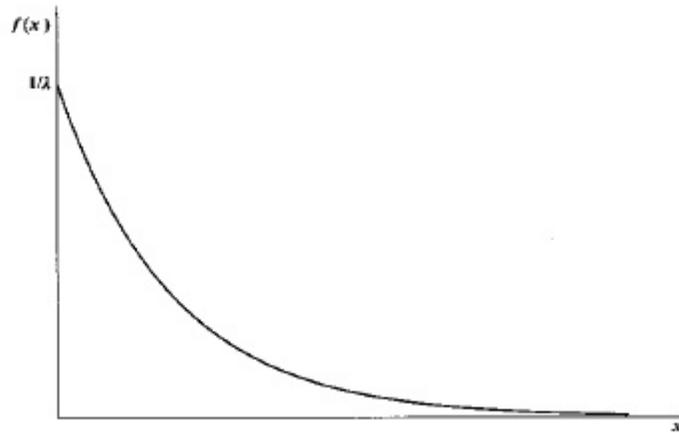
Exponencial (λ)

Figura 2.11: Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 265])

- Função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{para } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.22)$$

- Média:

$$\frac{a+b}{2} \quad (2.23)$$

- Variância:

$$\frac{(b-a)^2}{12} \quad (2.24)$$

- Aplicações mais comuns: Modelam processos em que todos os valores em um intervalo $[a, b]$ tem igual probabilidade de acontecer. Por exemplo, processo com tempos iguais. O gráfico da Figura 2.12 representa a distribuição.

2.8 Alto-falante

O alto-falante, também chamado de transdutor ou conversor é utilizado para transformar um sinal elétrico em pressão sonora, baseando-se em um conceito eletromecânico de movimentação do ar para geração do som, em que o bloco móvel é movido por uma força mecânica gerada pelo campo magnético, com o objetivo de transformar sinal elétrico (aplicado no terminal) em som (ondas sonoras). O funcionamento é baseado em uma corrente aplicada nos fios da bobina através da junção com o terminal, em que um campo eletromagnético é produzido no mesmo sentido da corrente. A força mecânica resultante causa a movimentação do diafragma em uma

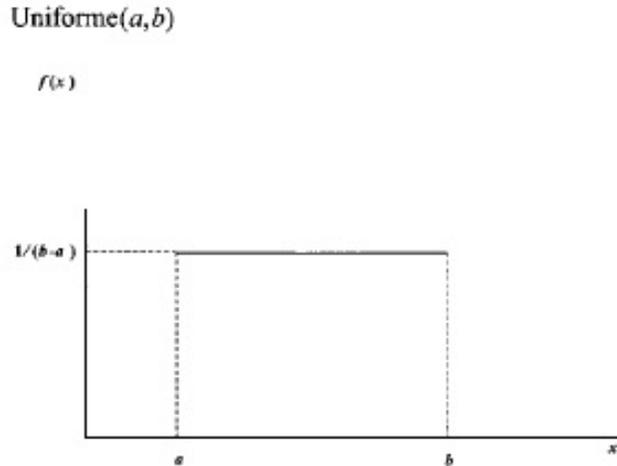


Figura 2.12: Gráfico de amostra Contínua no tempo (Fonte:[CHWIF and MEDINA, 2010, p 269])

direção perpendicular em relação ao campo do entre ferro e que conseqüentemente move o ar nos lados do diafragma, [DICKASON, 2006, p 3]. A Figura 2.13 ilustra as parte do alto-falante.

O alto-falante pode ser dividido em três partes separadas, que interligadas, compõem o sistema eletromecânico como um todo:

1. Conjunto magnético: composto pelo magneto, placa polar, T-yoke e entre ferro ou GAP.
2. Conjunto carcaça: composto pela carcaça, guarnição e terminais.
3. Conjunto móvel: composto pela bobina, membrana, malha, borda, centragem e coneto.

2.8.1 Conjunto Magnético

Parte composta por outras quatro partes, que inclui a placa polar, o magneto, t-yoke, que juntos formam o GAP, Figura 2.13. A placa polar e o t-yoke são feitos de material altamente permeáveis, tais como ferro, no qual provem parte do campo magnético no magneto, que por sua vez, é feito de ferrite e construído na forma de um anel. O conjunto desses três componentes é chamado de circuito magnético, que é completado pelo GAP, espaço vazio entre placa polar, magneto e t-yoke, onde é gerado um intenso campo magnético, função essa, de responsabilidade desse conjunto, [DICKASON, 2006, p 4].

2.8.2 Conjunto Carcaça

É formado pela carcaça, pela guarnição e pelos terminais, Figura 2.13. A função da carcaça é de sustentar o conjunto móvel e o conjunto magnético sem interferir na produção do som. Deve ser feito de material rígido (aço, alumínio ou plásticos) e deve sofrer tratamentos anti-corrosivos

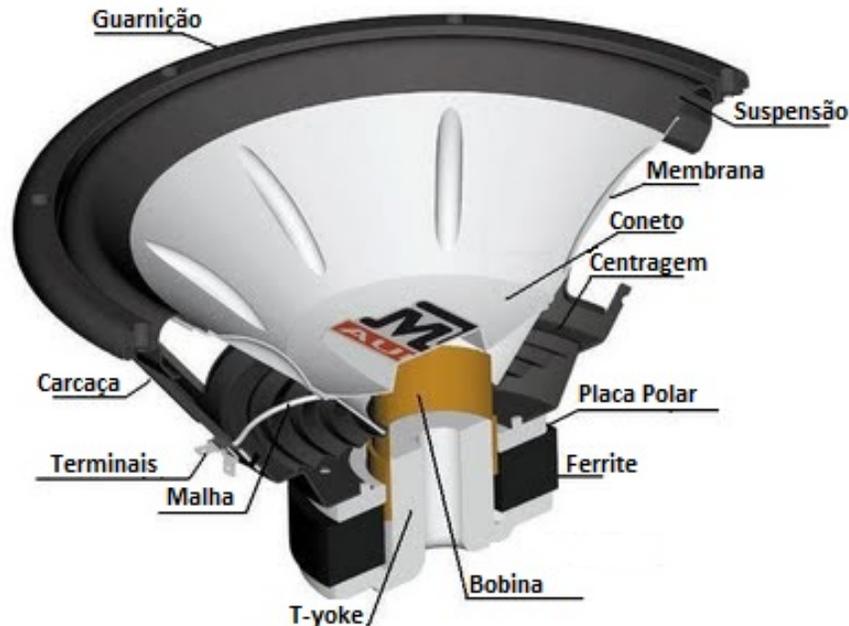


Figura 2.13: Partes de um alto-falante

para suportar várias condições adversas. Os terminais são os contatos por onde são ligados os fios dos aparelhos eletrônicos.

2.8.3 Conjunto Móvel

A primeira conversão de energia (elétrica em mecânica) ocorre quando colocamos a bobina móvel no GAP e aplicamos uma tensão elétrica alternada nos terminais. Quando a corrente elétrica alternada (CA) passa pelo fio da bobina que está imersa no campo magnético, surge uma força eletromagnética. Caso essa corrente seja aplicada na forma de uma onda senoidal a uma frequência de 60Hz, por exemplo, o sentido da corrente no semiciclo positivo da onda irá produzir um movimento em uma direção. Quando se altera o semiciclo para o negativo, a polaridade do fluxo faz com que o movimento da bobina seja no sentido oposto, repetindo esse ciclo alternadamente e movendo a bobina para cima e para baixo, já que essa força é perpendicular ao campo e ao fio da bobina.

Para reproduzir o movimento de forma exata, induzido pelo sinal senoidal, a bobina deve mover igualmente em ambas as direções no entreferro ou gap. Para isso acontecer, é importante que o campo magnético seja o mais simétrico possível, para que o movimento em uma direção seja de igual força do movimento no sentido oposto. Caso isso não aconteça, distorções no sinal e ruídos serão geradas.

O cone seguirá o movimento da bobina (para cima e para baixo) com a mesma frequência da corrente alternada aplicada, ou seja, a uma frequência de 60Hz, o conjunto irá de mover sessenta vezes por segundo. Quando o cone se desloca, ou seja, vibra para frente e para trás, ele movimentará o ar que está na sua frente criando uma região de compressão (quando ele vai para frente) e de rarefação (quando vai para trás). Porém, se não existisse a suspensão e a centragem

(que estão coladas no coneto e na carcaça) quando aplicássemos uma grande tensão elétrica nos terminais, a bobina iria para cima e sairia do conjunto magnético. Mas com esse sistema, o cone volta para baixo. Elas funcionam como a mola do alto-falante e ajuda a manter o coneto centralizado e provém a força de retorno necessária para manter a bobina dentro do entreferro ou gap, [DICKASON, 2006, p 10].

Sistemas de Produção - Estudo de Caso

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo faz uma descrição da empresa onde foi desenvolvido o estudo de caso, bem como o processo e o produto fabricado no mesmo. A empresa é do setor de autopeças, considerada de médio porte no Brasil e grande porte como grupo. O problema da empresa está na necessidade do aumento da capacidade produtiva devido a previsão de aumento da demanda.

O principal objetivo do trabalho é de representar, através da simulação à eventos discretos, uma nova linha automática de produção de alto-falantes, comprovando ou não as predições em relação à produtividade da linha, quando se comparada ao processo manual. Pretende-se obter um resultado otimizado para essas variáveis utilizando o software *Simul8*.

3.2 Descrição da Empresa

Em empresas de manufatura é muito comum a necessidade de alteração de processos, muitas vezes relacionada a mudanças no arranjo físico da planta. Em especial as empresas do segmento de autopeças, onde há grande exigência de atualizações tecnológicas e variação da demanda. A empresa, no Brasil, possui aproximadamente 400 colaboradores diretos, com a fabricação de diversos produtos de áudio da linha automotiva, tais como: alto-falantes, antenas, cabos, *tweeters* e chicotes.

No Brasil, a planta está situada na região central de Minas Gerais, sendo responsável pelo fornecimento dos produtos citados acima na maioria das montadoras do país e boa parte da América Latina. A organização da planta está baseada no conceito de mini fábricas. A divisão dessas fábricas é feita de acordo com o tipo de processo de fabricação do produto. O processo de produção é dividido em categorias, de acordo com o tipo de produto produzido e definido previamente no cronograma.

3.3 Descrição do Produto

A descrição geral do produto, sobre suas funções e componentes foi feita na Seção 2.8. De modo geral, o produto pode ser dividido em quatro partes: carcaça, circuito magnético, bloco

móvel e a conjunto móvel. A carcaça é injetada fora da empresa e o terminal sobre injetado da mesma forma. O circuito magnético é montado em um processo separado dentro da planta, e o produto final dessa etapa é levado até o processo principal de montagem. O bloco móvel é um conjunto formado pela bobina e centragem, montados no processo principal. A sequência de montagem do produto pode ser resumida da seguinte forma:

- Montagem do circuito magnético fora do processo principal;
- Inserção do circuito magnético na carcaça;
- Montagem do bloco móvel em um processo paralelo ao principal;
- Inserção do bloco móvel;
- Inserção da membrana e coneto;
- Solda dos terminais;
- Magnetização;

Alguns dos principais tipos de falha do produto estão fora do escopo de melhoria ou não do processo produtivo, ou seja, fazem parte do percentual mínimo de componentes do alto-falante que não são conformes. Dentre os principais tipos de falhas dessa categoria podemos citar: magneto quebrado ou trincado, t-yoke soltando a pintura superficial, bobina fora do diâmetro especificado ou com os seus filamentos danificados ou rompidos.

3.4 Descrição do Processo

Como toda proposta de simulação e modelagem, algumas considerações foram feitas no desenvolvimento do modelo de simulação, mas que não trazem prejuízos à fiel representação do sistema real. Essas considerações são importantes, pois, definem claramente a fronteira entre o sistema e o ambiente de sistema. Alguns problemas acontecem de forma aleatória, não tendo como prever, portanto, seu comportamento. Dessa forma foi assumido que o modelo não leva em consideração: possíveis quebras de equipamentos, falhas na esteira transportadora, falta de material, falta de eletricidade, acidentes de trabalho ou absenteísmo de operadores.

Para o desenvolvimento do modelo conceitual, foram identificados todas as restrições operacionais do processo. O resumo das operações podem ser vistos na Tabela 3.1.

- ES01 - Estoque de circuito magnético montado - O circuito magnético (t-yoke, ferrite e placa polar) é montado em uma etapa anterior fora da linha. O conjunto é disposto em pequenas caixas na esteira para facilitar o trabalho do operador. Essa etapa anterior de montagem do circuito não faz parte do escopo do trabalho.
- OP01 - Operação manual de prensagem do circuito magnético na carcaça - Operador aplica adesivo no circuito magnetico, o monta na carcaça e prensa o conjunto, acionando a prensa manualmente.

- TP01 - Transporte na esteira - após a etapa anterior, o operador dispõe o conjunto na esteira até o próximo posto.
- ES02 - Estoque de centragem e bobina - As bobinas são dispostas em *bliesters* com pequenos berços para disposição, já as centragens são empilhadas.
- OP02 - Operação manual de inserção da centragem na bobina e aplicação do adesivo - Operador insere bobina em uma máscara de referenciamento, em seguida, penteia os filamentos da bobina para cima e insere a centragem. Essa operação é feita no tempo morto de aplicação do adesivo, ou seja, enquanto ele é aplicado, o operador realiza a montagem do conjunto. O aplicador de adesivo é acionado manualmente.
- ES03 - Estoque de membrana - Os componentes são dispostos em tubos para facilitar o acesso do operador.
- OP03 - Operação manual de inserção da membrana no conjunto de centragem e bobina e aplicação do adesivo - Novamente a operação de inserção da membrana, com a malha inserida, acontece no tempo morto de aplicação de adesivo entre membrana e bobina. A aplicação de adesivo acontece ainda com o conjunto inserido na máscara de referenciamento. Ao final dessa operação, o conjunto montado passa a ser chamado de bloco móvel.
- TPO01 - Transporte com operação - Após a montagem do bloco móvel, o conjunto, ainda na máscara, é inserido em um pequeno carrossel, onde dispositivos com resistências realizam a aproximação para secagem do adesivo. Esse transporte ocorre em torno de 40s, até que o mesmo seja retirado do dispositivo.
- OP04 - Operação manual de soldagem dos filamentos - Após a secagem do adesivo, o operador realiza a soldagem manual dos filamentos da bobina na malha inserida na membrana.
- OP05 - Operação manual de aplicação de adesivo para proteção dos filamentos - Após a soldagem, uma proteção é aplicada para proteger os filamentos soldados. A aplicação também é feita de forma manual.
- TP02 - Transporte na esteira - Após o conjunto do bloco móvel montado e soldado, ele é disposto na esteira transportadora.
- OP06 - Operação semi-automática de aplicação de adesivo na carcaça e inserção da guia de montagem - O conjunto bloco móvel é retirado da esteira transportadora pelo operador e inserido em uma espécie de gabarito para que um aplicador de adesivo cartesiano faça a aplicação. No tempo morto da aplicação de adesivo de um produto a limpeza do GAP é realizada na próxima peça. Após a aplicação, uma guia centralizadora é inserida.
- TP03 - Transporte na esteira - Novamente, o conjunto retorna para a esteira transportadora.

- OP07 - Operação manual de inserção do bloco móvel na carcaça - O operador retira o bloco móvel e a carcaça da esteira transportadora e realiza a colagem e montagem do conjunto.
- TPO02 - Transporte com operação de secagem do adesivo em forno aquecido - Para secar o solvente do adesivo, o alto-falante é transportado pela esteira passando por um forno de secagem por aproximadamente 20s.
- OP08 - Operação semi-automática de prensagem do circuito - Após a passagem pelo forno de secagem o alto-falante é prensando na borda e colocado em carros fora da linha para transporte externo.
- TPE01 - Transporte externo - Posicionados em pequenas pilhas, os alto-falantes são transportados para uma cabine de repouso
- DE01 - Tempo de repouso para secagem dos altos-falantes - Posicionados na cabine, os adesivos dos alto-falantes são secos por exatos 45 minutos. Os carros são transportados para essa cabine de *delay* com aproximadamente 100 produtos.
- TPE02 - Transporte externo - Ao término do tempo de secagem, os alto-falantes são novamente levados para a linha de montagem para continuação do processo.
- ES04 - Estoque de conetos - Os conetos são dispostos em pilhas para inserção no alto-falante pelo operador.
- OP09 - Operação manual de aplicação de cola no coneto e inserção no alto-falante - O operador retira um coneto da pilha e aplica cola por um dispositivo de acionamento manual. No tempo morto da operação, ele retira o alto-falante do carro de transporte e realiza a inserção.
- TP04 - Transporte na esteira - Com conjunto praticamente montado, ele é transportado até o próximo posto de magnetização.
- OP10 - Operação semi-automática de magnetização do alto-falante e inserção da malha no terminal - O operador retira a guia centralizadora e insere as malhas nos terminais do alto-falante no tempo morto de magnetização, ou seja, enquanto um produto é magnetizado, outro está sendo preparado para ser mais o próximo.
- TP05 - Transporte na esteira - O conjunto é novamente transportado na esteira até a próxima etapa.
- OP11 - Operação semi-automática de soldagem da malha nos terminais - Com as malhas inseridas nos terminais, o operador retira o alto-falante da esteira, o insere em um gabarito de posicionamento e aciona a máquina de solda.
- TP06 - Transporte na esteira - Com o produto todo montado, ele é disposto na esteira para a fase final de montagem.

- OP12 - Teste acústico - O operador insere um conector nos terminais e realiza o primeiro teste elétrico do produto. Nessa etapa, o operador é capaz de identificar erros, como por exemplo, GAP sujo, bobina amassada ou fora de centro, solda incompleta, entre outros.

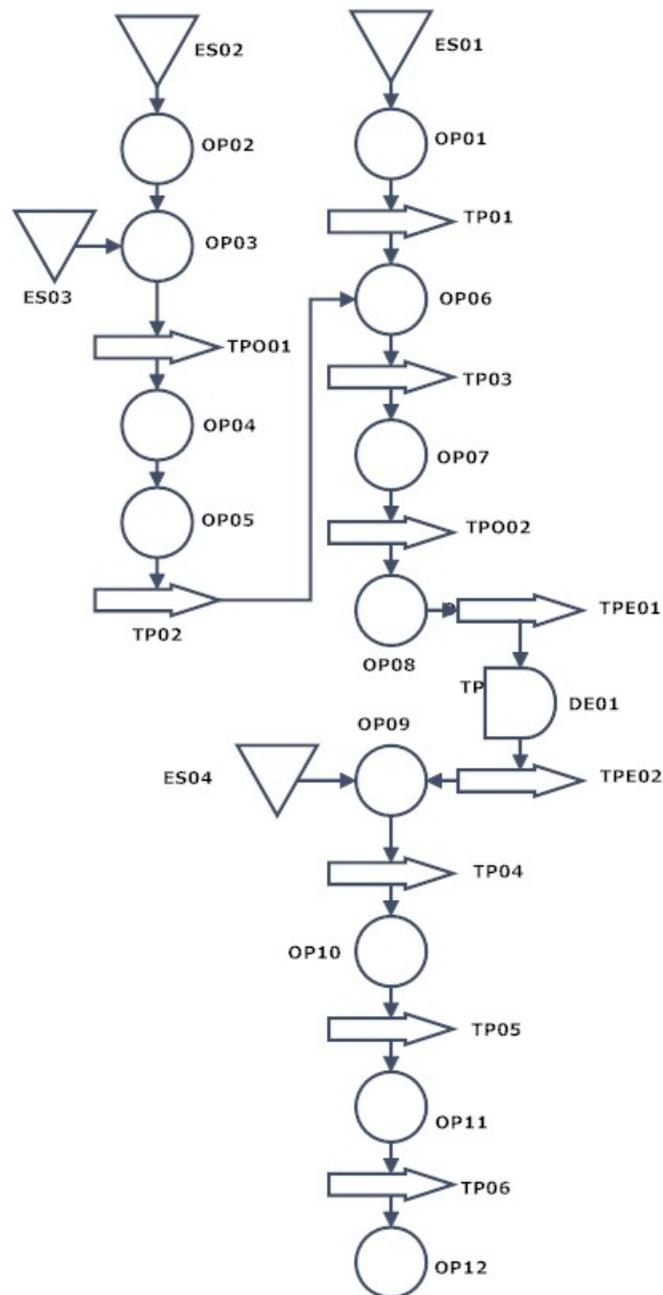


Figura 3.1: Fluxograma do processo

3.5 Descrição do Problema

Entre 2009 e 2011 foi iniciado o processo de reorganização da planta da empresa, passando por uma reestruturação de *layout*, com aumento de eficiência e produtividade. Passada esta

Operação manual	12
Transporte na esteira	6
Estoque de matéria-prima/produto	4
Transporte externo	2
Transporte com operação	2
Repouso de produto	1
Setup	20min

Tabela 3.1: Resumo de operação do processo manufaturado

etapa de reorganização, a fábrica continuou com o seu ritmo produtivo e naturalmente com o seu processo de melhoria contínua, reavaliando os seus processos e meios produtivos conforme a entrada de novos produtos e variação de demanda. Esse crescimento, no entanto, foi um pouco interrompido pela crise mundial de 2012, principalmente pela crise europeia, já que a empresa é italiana. Isso retardou investimentos de melhoria da planta, além de diminuir demandas de alguns produtos. Na tentativa de recuperação da crise, o governo lançou algumas medidas de incentivo a indústria, principalmente com a redução do IPI, o que gerou um aumento na produção de automóveis, e conseqüentemente no setor de autopeças.

O planejamento da capacidade produtiva é realizado com base nas previsões de venda e volume de peça de acordo com os clientes. Com esses novos volumes de vendas e com novos clientes, a empresa se viu na necessidade de ampliar sua produção e aumentar a qualidade dos produtos. A sua expectativa para o próximo ano é de quase dobrar sua produção para atender aos novos volumes. Quando a capacidade atinge 100% (ou acima), isto implica que a produção terá que usar do recurso de hora extra, em alguns casos terceiro turno, para atender a demanda e em um determinado momento até mesmo com as horas extras e revezamentos nos horários de refeição, a fábrica não conseguirá atender a demanda do mercado. Esta situação expõe a empresa a alguns riscos, como por exemplo: perda de mercado para a concorrência, multa por atraso de entrega e parada da linha de montagem do cliente, imagem comprometida junto ao cliente, perda da lucratividade planejada em função de horas extras e outros custos adicionais.

Com base nestes cenários, a empresa necessita tomar algumas ações antecipadamente visando evitar prejuízos. Essas decisões passam primeiramente por mudanças na planta para aumento na produtividade. Dessa forma, no nível de produção que a empresa se encontra, o próximo passo seria a automação completa ou parcial da produção, de acordo com investimentos previstos, para o aumento da produtividade e da qualidade, além é claro, da redução de custos de produção.

3.6 Modelagem dos Dados

De acordo com [CHWIF and MEDINA, 2010, p 24] não podemos prever o tempo exato que o operador da linha manufaturada gasta para realizar a operação. Ainda sim, podemos estimar o seu comportamento probabilístico, a partir da observação dos tempos que o mesmo realizou na mesma operação. Como nenhuma atividade humana pode ser repetida exatamente no mesmo tempo em todas as ocasiões, trata-se de uma variável aleatória. Dessa forma, todo o modelo

de simulação será construído a partir da observação e levantamento de dados do processo, de modo que este modelo seja o mais representativo possível do sistema real.

Métodos estatísticos são usados para nos ajudar a entender a variabilidade, Seção 2.6. De acordo com [MONTGOMERY and RUNGER, 2009, p 3] um procedimento efetivo de coletar dados pode simplificar grandemente a análise e conduzir a um melhor entendimento da população ou processo que está sendo estudado. O estudo da modelagem dos dados, seguindo a divisão feita por [CHWIF and MEDINA, 2010, p 25], será segmentada em três etapas: coleta de dados, tratamento dos dados e inferência.

3.6.1 Coleta de Dados

A coleta de dados foi feita por amostragem, já que é impraticável realizar-se o levantamento de dados de toda a população. Foram definidas as variáveis de entrada como sendo os tempos padrões gastos de cada operação manual da linha de produção. Os tempos de movimentação, inspeção e espera, são também importantes e serão descritos. Já os processos automáticos foram considerados com tempos constantes.

Para a cronometragem dos tempos, primeiramente foi definido o número necessário de ciclos de coleta para um grau de confiança de 95% e erro relativo entre 5% e 10%, utilizando a equação de ciclos, apresentada na Seção 2.2.

Os tempos foram tomados durante a fabricação normal de alto-falantes com o auxílio de um profissional com experiência cronoanálise, com o intuito de identificar o ritmo de operação que cada operador estava executando. Foram coletados vinte tempos para cada operação do Fluxograma da Figura 4.2. A avaliação do ritmo foi feita de acordo com o tópico abordado na Seção 2.2.

As folhas de coleta de dados apresentam os valores tomados para cada atividade, bem como o ritmo apresentado e a correção feita.

Os ciclos de trabalho de cada operador em cada posto de trabalho é nitidamente influenciável, variando sobre determinadas condições de trabalho, por exemplo, tempo de treinamento do operador, repetibilidade do processo, que em alguns casos gera imprecisão, além de questões físicas, que serão ainda discutidas.

As operações de abastecimento da linha, embalagem e estoque do produto final não fazem parte do escopo, não por características técnicas, mas por não serem relevantes dentro dos objetivos propostos.

3.6.2 Tratamento dos Dados

Após a coleta dos dados é preciso realizar o tratamento dos mesmos, o que inclui retirar as informações necessárias dos dados após um tratamento estatístico. Utilizando as ferramentas da Estatística Descritiva, Seção 2.6, podemos explorar o conjunto de dados de cada posto em separado. Nessa fase extraímos as medidas de posição (média, mediana, moda, etc.) e de dispersão (variância, amplitude, coeficiente de variação, etc.) da variável aleatória em estudo. A Tabela 3.2 apresenta um resumo dos tempos retirados dos postos de trabalho, com média,

Operação	Mínimo	Máximo	Média	KS	Distribuição	<i>p-value</i>
OP01	5,4	5,96	5,596	0,150	Lognormal	0,703
OP02	4	5,2	4,535	0,141	Normal	0,769
OP03	4,4	5,3	4,935	0,142	Normal	0,760
OP04	4	5,2	4,545	0,114	Normal	0,930
OP05	4,5	6,1	5,360	0,143	Normal	0,759
OP06	5	6,5	5,690	0,151	Lognormal	0,695
OP07	4,9	6,2	5,615	0,158	Normal	0,645
OP08	3,2	4,5	3,880	0,123	Normal	0,887
OP09	3,8	5,2	4,480	0,118	Lognormal	0,911
OP10	5,4	7,1	6,330	0,126	Normal	0,868
OP11	4,7	6,2	5,460	0,132	Lognormal	0,832
OP12	4,3	5,4	4,925	0,121	Normal	0,898

Tabela 3.2: Resumo de tempos do processo manufaturado

valores máximos e mínimos, o parâmetro KS e a distribuição que melhor se adere ao conjunto de dados.

Toda cronometragem de tempos em sistemas de produção como esse está sujeito a valores não usuais conhecidos como *outliers*, [CHWIF and MEDINA, 2010, p. 28]. As razões mais comuns para o seu surgimento são algum erro na coleta de dados ou um evento raro e totalmente inesperado. Para esse processo em estudo podem surgir alguns eventos tais como:

- Equipamento não calibrado corretamente para execução da tarefa, realizando-a em um tempo acima da média;
- Maquinário parar por algum motivo externo, por exemplo, queda de energia, falha na manutenção, uso incorreto por parte do operador;
- Operadores em treinamento, sua capacidade de trabalho é menor que a prevista;
- Questões pessoais do operador, tais como níveis de estresse, posição no posto de trabalho e rotatividade nas operações.

Essas situações são atípicas, mas de qualquer forma podem afetar a veracidade de um grupo de dados, distorcendo as estimativas, os níveis de significância dos testes estatísticos e levando a conclusões equivocadas.

O modo gráfico de representar o *outlier* é através do gráfico *box-plot*. Nesse gráfico, a *caixa* marca o intervalo entre os primeiros e terceiros quartis, e as linhas retas verticais representam os extremos para os valores não discrepantes. Um *outlier* é representado, portanto, por um ponto fora das linhas verticais. Para as amostras da linha de produção, foram analisados todos os gráficos referentes aos dados, nenhum deles apresentou um ponto fora do padrão após toda a primeira análise. Para exemplificar esse estudo, o gráfico da Figura 3.2, representa o *box-plot* do Operação 09, é possível verificar que não há pontos fora do intervalo.

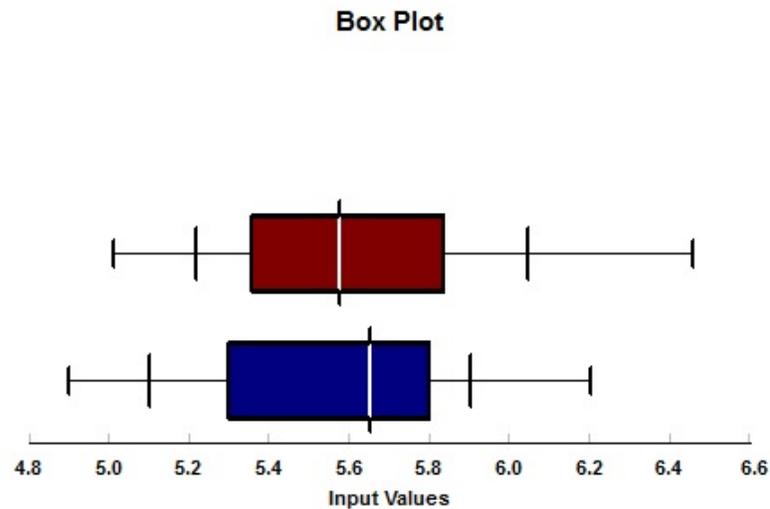


Figura 3.2: Gráfico Box-plot para amostra de tempos da Operação 09

Após a análise se houve *outliers* na amostra, cabe ainda uma análise de correlação, um estudo para verificar se a amostra representa sequências de valores independentes e identicamente distribuídos, [CHWIF and MEDINA, 2010, p. 31]. Da mesma forma da etapa anterior, foram feitas as análises de correlações para todas as amostras de dados, mantendo a Operação 09 como exemplo, o gráfico da Figura 3.3 representa o Diagrama de Dispersão dos tempos de operação.

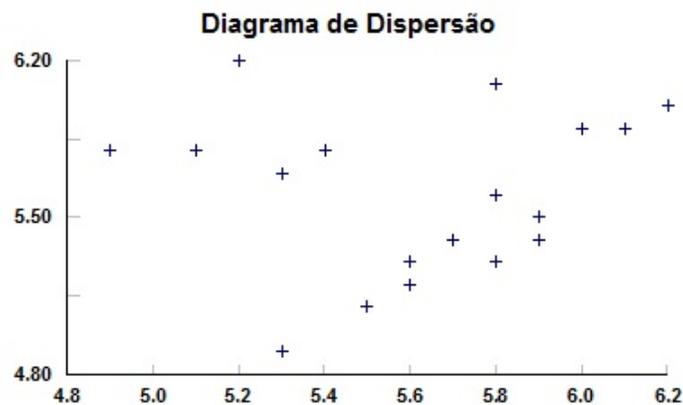


Figura 3.3: Diagrama de Dispersão para amostra de tempos da Operação 09

Quando os dados não apresentam correlação, gráfico da Figura 3.3, os pontos tendem a se dispersar de modo aleatório pelo gráfico. Quando os dados apresentam correlação, eles tendem a se distribuir ao longo de linhas com inclinação positiva ou negativa, dependendo da distribuição envolvida, [CHWIF and MEDINA, 2010, p. 32].

Proposta de Melhoria - Processo Automático

4.1 Introdução

A proposta de melhoria é de alterar todo o processo produtivo, que é feito de forma manual, para um processo completamente automático. Nesse novo processo a única função atribuída a um operador é de manter todos os postos de estoque devidamente abastecidos. O tempo médio para reabastecimento projetado foi de aproximadamente duas horas, ou seja, um único operador é capaz de realizar todo o abastecimento. Para alguns postos de trabalho foram utilizados dispositivos de mercado para automação, já para outros foram projetados e desenvolvidos dispositivos especiais para realizar tal função. Esses últimos, por terem sido desenvolvidos dentro da empresa e não serem comerciais, não serão discutidos neste trabalho como foram feitos, já que, neste caso, trata-se de patentes. Além disso, em alguns postos houve uma mudança na estrutura do produto, bem como no modo como ele é recebido pela empresa. Novamente, não iremos aprofundar em detalhes, pelos mesmos motivos explicados acima. O objetivo de estudo, neste capítulo, é comparar ambos os processos e verificar o que foi discutido em relação as formas de automações propostas individualmente, ou seja, verificar como era o processo manual e como foi concebido de forma automática. Para complementar a discussão, todos os postos de trabalho, referenciados na Seção 3.4, serão explicados, seguindo a mesma ordem, e apresentados, não necessariamente na mesma ordem, já que a ordem do processo automático é diferente, na Seção 4.3. Como não haverá esteira transportadora, todos os transportes, exceto os com operação, serão automaticamente desconsiderados.

4.2 Melhorias no Processo

Apesar da proposta de um processo completamente automático ser muito inovadora, tudo tem um preço, e esse preço é o seu alto valor de investimento e conseqüentemente um maior tempo de *payback*. Dado a descrição do problema na Seção 3.5 e apesar do estudo ter sido feito baseado nessa versão de linha de produção, muito provavelmente não será esse o processo implantado. Dessa forma, o estudo se limita a comparar uma possível implantação, simulando o projeto como previsto, deixando em aberto futuras simulações de processos que sejam de fatos implantados.

O projeto de uma linha automática contempla mais do que somente a simulação de processo e não faz parte do escopo do trabalho. Além disso, por ser um projeto altamente inovador e por questões de confidencialidade, maiores detalhes sobre construção e desenvolvimento das automações dos postos não foram divulgadas. Dessa forma, a Figura 4.1 apresenta de forma representativa, em fase de projeto, a proposta de automação completa da linha de produção. Por se tratar de um grande escopo, foram feitas alterações posto a posto, o que houve de mudança em relação ao antigo processo, seguem abaixo:

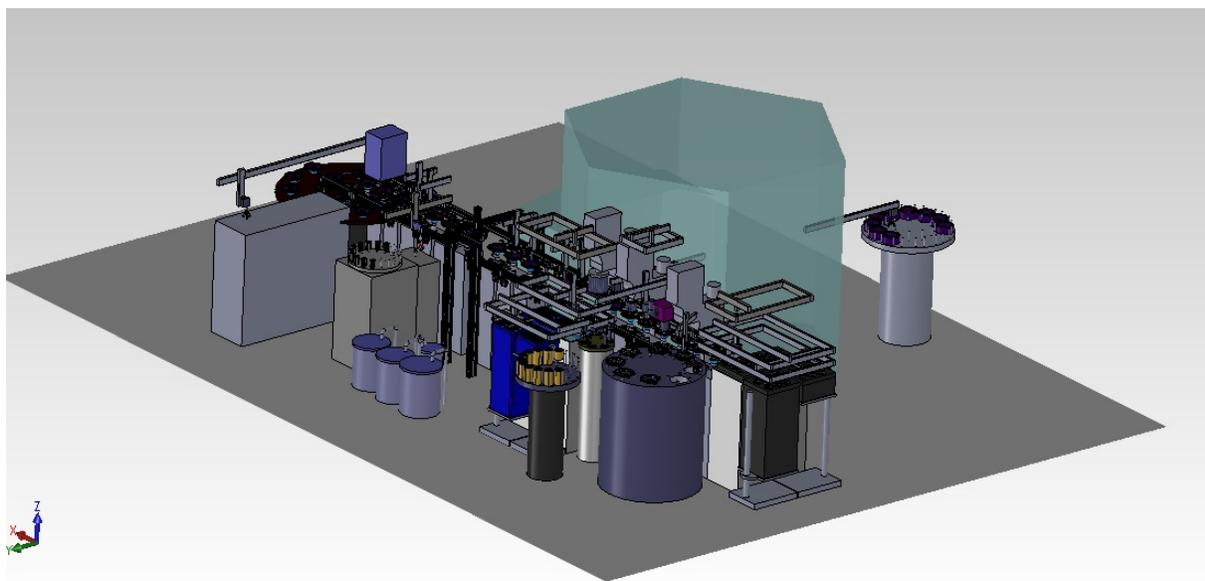


Figura 4.1: Layout representativo da linha automática

- O estoque ES01 passa a não mais existir, já que o circuito magnético irá entrar na linha de produção já sobreinjetado na carcaça.
- Pelo mesmo motivo acima, a operação OP01 não existirá, pois não é mais necessária a prensa no conjunto sobreinjetado.
- O estoque ES02 será dividido em dois, ou seja, um estoque somente para bobinas e um estoque para centragens. O estoque de bobinas será supervisionado por um sistema de visão, para gerar as referências de posicionamento e o estoque de centragem será em uma mesa rotativa.
- A operação OP02 passa a não mais ser manual e a inserção dos dois componentes será feita individualmente em um magazine rotativo, ou seja, primeiro a bobina é inserida, já com os filamentos penteados, e no posto posterior a centragem é inserida.
- A operação OP03 foi dividida em dois postos, inserção da membrana na carcaça e aplicação do adesivo, ambos serão feitos automaticamente. A membrana já será posicionada assim que for retirada do dispositivo de inserção da malha.

- O transporte com operação TPO01 não será mais realizado, já que, o processo de secagem do adesivo será modificado para diminuir o tempo de atravessamento.
- A operação OP04 será feita por manipuladores cartesianos, que realizarão a solda dos filamentos.
- A operação OP05 segue o mesmo modelo acima, em que o manipulador realiza a aplicação do adesivo preto na solda.
- A operação OP06, que era semi-automática, passa apenas a ter o seu acionamento automático, de acordo com o sinal de presença de peça. Como estamos sempre referenciando o alto-falante pela base, não será mais necessário a utilização de guias para centralização.
- O transporte com operação TPO02 também não existirá, pelo mesmo motivo apresentado no item relacionado ao processo TPO01.
- Os transportes externos TPE01 e TPE02, não serão necessários pelos motivos de mudança no processo de secagem do adesivo, ou seja, não necessitará mais de 45 minutos de repouso, o que também exclui a operação DE01.
- O estoque ES05 será feito em mesas rotativas, utilizando o mesmo conceito automático dos estoques anteriores.
- A operação OP07 continua sendo realizada de forma a agrupar as duas tarefas, porém de forma automática, dentro do tempo de ciclo da linha.
- A operação OP10 será dividida em duas. A primeira, magnetização, que era semi-automática, passa a ser acionada de forma automática, de acordo com o sinal de presença de peça. A segunda, inserção da malha, será feita em outro posto de trabalho.
- O teste TE01 continua sendo realizado, mas de forma automática, tanto a inserção dos conectores, quanto a leitura das frequências.

4.3 Descrição do Processo Automático

- ES01 - Estoque de circuito magnético sobreinjetado na carcaça - Os componentes são dispostos em uma mesa rotativa.
- OA01 - Operação de inserção do conjunto circuito magnético e carcaça - O manipulador retira o conjunto do estoque e insere no primeiro posto da linha de montagem.
- OA02 - Limpeza do GAP - Manipulador realiza a limpeza do GAP utilizando sopro e sucção de ar.
- ES02 - Estoque de bobinas em *bliesters* - As bobinas são dispostas no *bliester* com 120 unidades.

- OAS01 - Inserção da bobina na carrossel com supervisão - Sistema de visão realiza a leitura do posicionamento das bobinas, que são retiradas pelo manipulador e inseridas no primeiro posto da giostra.
- ES03 - Estoque de centragem - As centragens são dispostas em magazines rotativos.
- OA03 - Inserção da centragem na giostra - Manipulador retira a centragem do estoque e a insere na bobina no segundo posto da giostra.
- OA04 - Aplicação de adesivo entre centragem e bobina - Aplicador de adesivo rotativo aplica cola ao longo do perímetro da bobina.
- OA05 - Secagem do adesivo em dois postos com um manipulador - Apenas um manipulador com dois dispositivos de secagem, realiza a secagem de dois blocos móveis.
- OAS02 - Inserção do bloco móvel na carcaça na linha de montagem com supervisão - Retirada e do bloco móvel da giostra e inserção na carcaça na linha de montagem, o sistema de visão é utilizado para garantir a referência de posicionamento.
- OA06 - Soldagem da centragem na carcaça - Manipulador realiza a solda entre a borda da centragem e carcaça.
- ES04 - Estoque de membrana - Os componentes são dispostos na mesa rotativa.
- OA07 - Inserção da malha na membrana - Processo automático realizado fora da linha de montagem por vários dispositivos que, juntos, retiram a membrana do estoque e inserem a malha na componente.
- OA08 - Inserção da membrana na carcaça - Manipulador retira a membrana do dispositivo anterior e o posiciona diretamente na carcaça, na linha de montagem.
- OA09 - Soldagem da membrana na carcaça - Manipulador realiza a solda da borda da membrana na carcaça.
- OA10 - Aplicação de adesivo entre membrana e bloco móvel - Manipulador rotativo realiza a aplicação de adesivo entre os componentes.
- OA11 - Secagem do adesivo em dois postos com um manipulador - Assim como na operação OA05, apenas um manipulador com dois dispositivos de secagem, realiza a secagem de dois blocos móveis.
- OA12 - Posicionador dos filamentos da bobina - Um manipulador com um dispositivo particular realiza o posicionamento e correto alinhamento dos filamentos da malha da membrana.
- OA13 - Solda da malha nos fios da bobina - Manipulador realiza a solda entre os filamentos da bobina e malha da membrana.

Operação automática	24
Estoque de matéria-prima/produto	5
Transporte externo	0
Transporte com operação	0
Setup	1min

Tabela 4.1: Resumo de operação do processo automático

- OAS03 - Inserção da malha no terminal com supervisor - O sistema de visão encontra o posicionamento da malha e a insere nos terminais. Dois manipuladores realizam essa operação, cada um responsável por um lado do alto-falante.
- OAS04 - Solda das malhas nos terminais com supervisor - Manipulador realiza a solda da malha nos terminais e sistema de visão realiza o controle de qualidade da solda.
- ES05 - Estoque de coneto - Os componentes são dispostos na mesa rotativa.
- OA14 - Aplicação de adesivo e inserção do coneto no conjunto do alto-falante - O manipulador retira o coneto do estoque, recebe a aplicação de adesivo em uma estação intermediária e o insere na alto-falante na linha de montagem.
- OA15 - Aplicação da cola preta - Manipulador aplica cola preta na região de solda entre filamento da bobina e malha.
- OA16 - Secagem da cola preta e cola branca - Manipulador com um dispositivo particular realiza a secagem da cola preta e da cola cascorez ao mesmo tempo.
- OA17 - Magnetização - Alto-falante é magnetizado em um processo similar ao da linha de montagem manual.
- OA18 - Teste acústico - O alto-falante montado é testado pela primeira vez, o manipulador insere o conector e realiza o teste.
- OAS05 - Aplicação de jato de tinta para identificação com supervisor - Manipulador com jato de tinta realiza a aplicação para identificação do alto-falante, o sistema de visão realiza a supervisão da qualidade da aplicação de tinta.
- OA19 - Retirada dos alto-falantes defeituosos - Retirada de todos os alto-falantes defeituosos informados pelo sistema supervisor da linha.

4.4 Validação do Processo

Como a proposta de automação estava na frase de projeto, foi validar o modelo, para verificar quais são as dificuldades mecânicas para a automação, bem como de reproduzir os movimentos manuais em um processo automático. Para essa avaliação, em cada posto de trabalho estudado

foram feitos testes, conforme descritos brevemente na introdução do trabalho. As avaliações partiam de projetos mecânicos que foram prototipados e em sua maioria testados e validados. Dessa forma, a maioria das melhorias descritas na Seção 4.3 foram testadas em um manipulador cartesiano, XYZ, no qual para as diferentes situações era programado para executar tarefas em repetição.

Como dito anteriormente, a validação foi feita em um robô cartesiano, do tipo XYZ, conforme a Figura 4.3. Sua construção foi feita por um fornecedor externo, mas toda sua programação foi modificada para adequação as nossas diferentes tarefas que deveriam ser realizadas, como por exemplo: secagem do adesivo, aplicação dos adesivos, limpeza do entreferro, inserção do coneto, realização parcial da solda e identificação. Um ponto importante é que foram consideradas todas as tolerâncias de processo, ou seja, a própria base foi contruída para respeitar tolerâncias centesimais e se adequar a não conformidade, em alguns casos, dos componentes externos. Todo o processo de projeto mecânico dos dispositivos foi desenvolvido para testar o processo, mas não serão explicados com detalhes por se tratarem de protótipos especiais e não de mercado.

Para exemplificar como foram feitos os testes, são descritos dois processos que foram testados: secagem do adesivo e limpeza do entreferro. O primeiro teste foi realizado através de um dispositivo projetado e construído conforme a Figura 4.4. Sua função é esquentar o ar que entra lateralmente e através da troca de calor com o corpo da resistência interna, o ar é aquecido até alcançarmos a temperatura ideal de cura do adesivo. Com um termopar interno, foi possível obter a referência de temperatura para realizarmos o controle da mesma, esse feito por um pequeno controlador PI. Após os testes de prova, conseguimos uma temperatura de aproximadamente $210^{\circ}C$, o suficiente para realizar a cura do adesivo dentro do tempo de processo da linha, mais o tempo de movimentação. É importante observar que o dispositivo foi muito bem projetado para cobrir pequenos desvios de alinhamento entre ele, a bobina do produto e a base que o centraliza. Qualquer diferença decimal seria inviável para o projeto, já que poderia acarretar desvios na produção. De toda forma, o principal ganho nesse processo, foi a eliminação do tempo de cura externa do adesivo e adequação do tempo do posto com o tempo do processo.

O segundo teste foi realizado através do dispositivo, também projetado e contruído internamente, conforme a Figura 4.5. Anteriormente, no processo manual, a limpeza do entreferro era feita manualmente, por um sistema de sopro de ar, ou seja, o operador insere o produto em um berço de centralização e o sopro de ar é direcionado na região do gap. A proposta de melhoria do posto segue o raciocínio de todo o trabalho, deixá-lo automático, sem a interferência do operador. Para isso foi contruído o dispositivo apresentado que penetra no interior do entreferro e com quatro agulhas realiza o sopro interno de ar. Novamente, toda a parte mecânica foi exaustivamente avaliada para que não houvesse falha na inserção das agulhas, já que o espaço disponível, atrelado com a precisão de todo o sistema, foi considerado complexo. A ideia do dispositivo era de criar ondas de escoamento turbulento dentro do entreferro para retirar as partículas de impurezas que por ventura poderiam estar no seu interior. Os testes, de qualquer forma, são limitados no que diz respeito a quantidade de peças e ritmo de produção, mas os resultados foram bons, foi possível reduzir o número de rejeição por impurezas no entreferro.

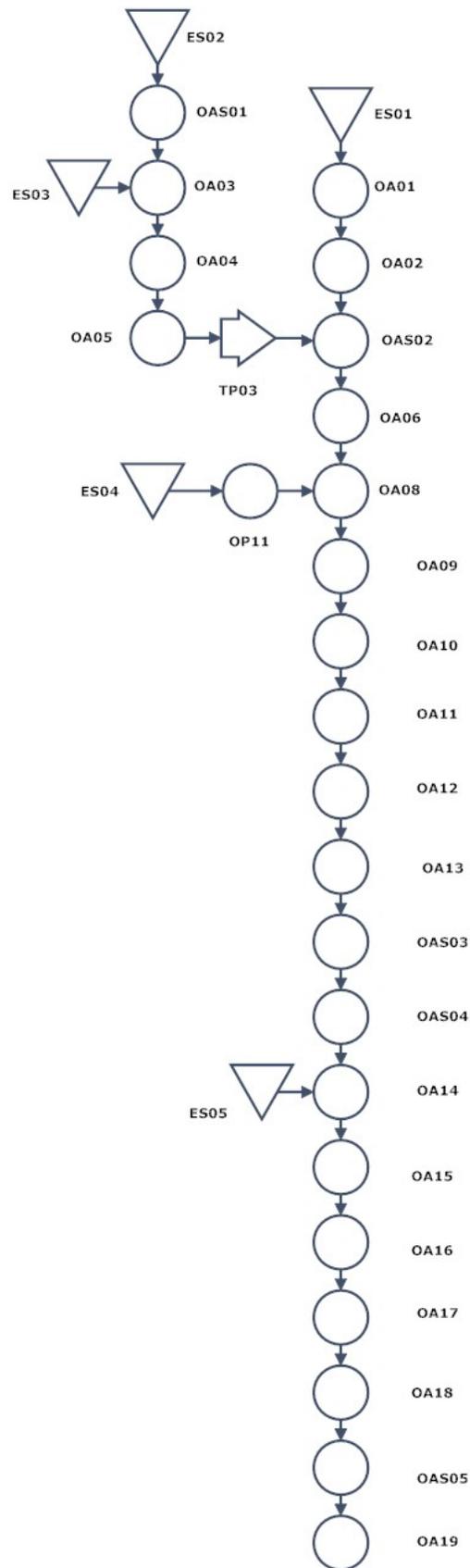


Figura 4.2: Fluxograma do processo

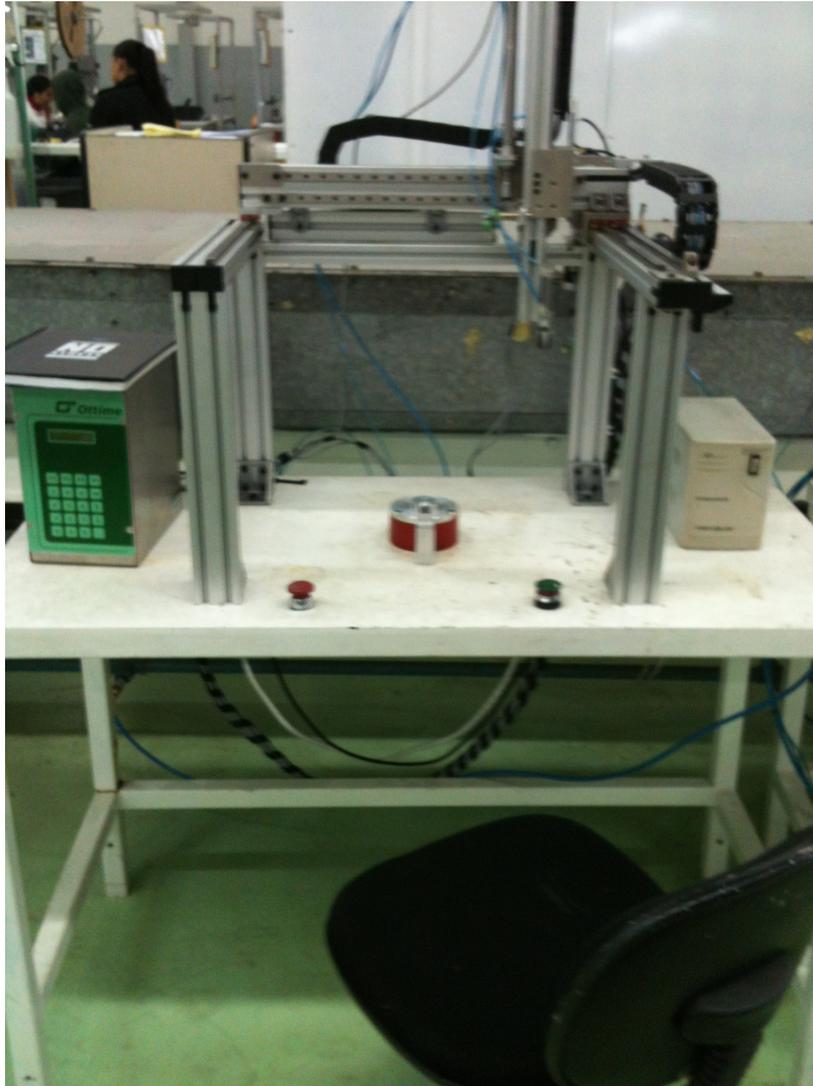


Figura 4.3: Manipulador cartesiano para validação

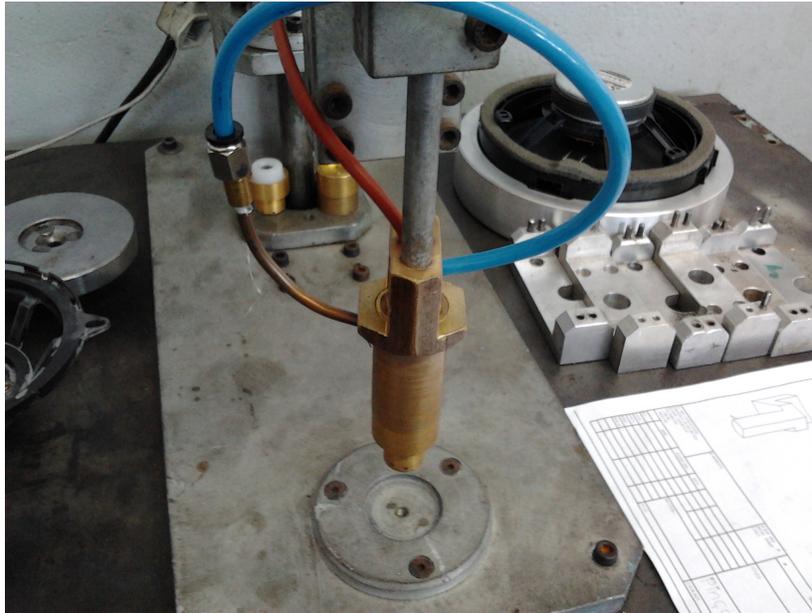


Figura 4.4: Validação da secagem do adesivo



Figura 4.5: Validação da limpeza do entreferro

Simulação Computacional

5.1 Sistema de Simulação

Muitas vezes a simulação falha não por causa da falta de domínio da ferramenta de simulação (*software*), mas pela falta do entendimento do sistema. O entendimento do sistema inicia-se pela própria definição do que é um sistema e posteriormente entendendo os inter-relacionamentos dos diferentes elementos que compõe este sistema. Este tópico fará uma revisão sobre os principais pontos sobre sistemas e seus elementos.

5.1.1 Definição do Sistema

Sistema é uma coleção de elementos que juntos espera-se que atinjam um objetivo. Segundo Duarte [2003] sistema é uma coleção de pessoas e ou máquinas interagindo juntos de modo a realizarem bem algum trabalho e de modo lógico. Na prática, o significado de sistema depende dos objetivos de cada estudo, podemos destacar três pontos importantes sobre sistema:

- um sistema consiste em diversos elementos;
- estes elementos estão inter-relacionados e trabalham em conjunto;
- o sistema existe com o propósito de atingir um objetivo específico.

Como exemplos de sistemas podemos citar: na área de serviços um banco ou um supermercado; na área industrial poderá ser desde um simples posto com trabalho manual ou uma célula complexa de uma linha de montagem ou mesmo uma indústria completa como uma refinaria de petróleo; na área de engenharia aplicada pode-se simular o comportamento de um fluido através de uma tubulação.

5.1.2 Elementos do Sistema

Para a simulação os elementos de um sistema são as entidades, atividades (tarefas), recursos, e controles. Estes elementos definem quem, qual, onde, quando e como uma entidade é processada. Segundo Duarte [2003], a caracterização de cada um dos quatro elementos do sistema é a seguinte:

- entidades são dos elementos processados através do sistema como produtos, clientes e documentos e são classificadas em três tipos: humana ou animada, inanimada e intangível;
- atividades são as tarefas diretas ou indiretas envolvidas no processamento das entidades, normalmente as atividades gastam tempo e recursos;
- recursos são os meios pelos quais as atividades são executadas, como exemplo: máquinas e operadores podem ter a mesma classificação das entidades ou ainda serem classificados como dedicados ou gerais, permanentes ou consumíveis e estacionários ou móveis;
- controles são itens que dizem ao sistema como, quando e onde as atividades devem ser executadas. Como exemplos pode-se citar os planos de produção, instruções operacionais e rotas de fabricação.

5.1.3 Variáveis do Sistema

Quando um sistema é modelado ou quando este modelo é existente, necessita-se entender como os elementos desse sistema interagem e a sua performance. Para auxiliar o entendimento dessa interação e possibilitar a análise dos resultados, segundo Duarte [2003], necessita-se compreender três tipos de variáveis do sistema para poder atuar sobre o mesmo entendendo e determinando as inter-relações existentes:

- Variáveis de decisão são as variáveis independentes do sistema, pois através dessas variáveis é possível controlar o sistema criando diferentes cenários e conduzir a simulação de acordo com os objetivos e interesses estabelecidos pelo modelador ou usuário;
- Variáveis de resposta ou variáveis de saída são as respostas que o sistema fornece em função dos dados de entrada e da interação entre os elementos do sistema;
- Variáveis de estado são as variáveis que indicam o estado do sistema ou de um elemento em um determinado ponto e momento.

5.2 Metodologia de Simulação

A construção de um modelo conceitual válido é de suma importância, pois, de acordo com [LAW, 2008, p 1], se o modelo não for uma aproximação fechada do sistema real, quaisquer conclusões derivadas do modelo são susceptíveis de ser errada e podem resultar em decisões dispendiosas. De toda forma, a concepção do modelo deve ser uma abstração e simplificação da realidade, com objetivos definidos e tempo necessário para sua construção. Para isso é necessário que o projetista conheça de fato o processo e tenha uma abordagem definitiva para o estudo. Em seu artigo, LAW [2008] apresenta passos de como conduzir um estudo de simulação bem sucedido, apresentadas na Figura 5.1 e descritos abaixo:

1. Passo 1 - Formulação do Problema

- O problema de interesse é decidido;

- Objetivos gerais do estudo;
 - Métodos que serão utilizados para quantificar eficácia do processo;
 - Escopo do modelo;
 - As configurações do sistema a ser modelado;
 - Prazo para estudo e recursos necessários.
2. Passo 2 - Coleta de informações do sistema e procedimentos
- Coleta de dados para determinação da distribuição probabilística;
 - Verificar disponibilidade de dados para nível de detalhe do projeto;
3. Passo 3 - A análise é válida?
- Se erros ou omissões forem encontrados, esses devem ser atualizados antes da construção do modelo computacional;
 - Verificação por parte de especialistas para validação.
4. Passo 4 - Programar o modelo
- Programar o modelo em um *software* comercial;
 - Verificar (debugar) o programa.
5. Passo 5 - O modelo computacional é válido?
- Se existir de fato um sistema real, comparar os dados de saída de ambos para validar o modelo;
 - Revisão dos resultados da simulação;
 - Análise de sensibilidade dos resultados.
6. Passo 6 - Análise dos resultados
- Decidir sobre questões táticas, como por exemplo, período de aquecimento e número de repetições do modelo;
 - Analisar resultados e verificar se experimentos adicionais são necessários.
7. Passo 7 - Documentação e apresentação dos resultados
- Pressupostos do projeto para uma futura reutilização;
 - Apresentação final deve possuir uma animação do modelo construído para promover uma maior credibilidade.

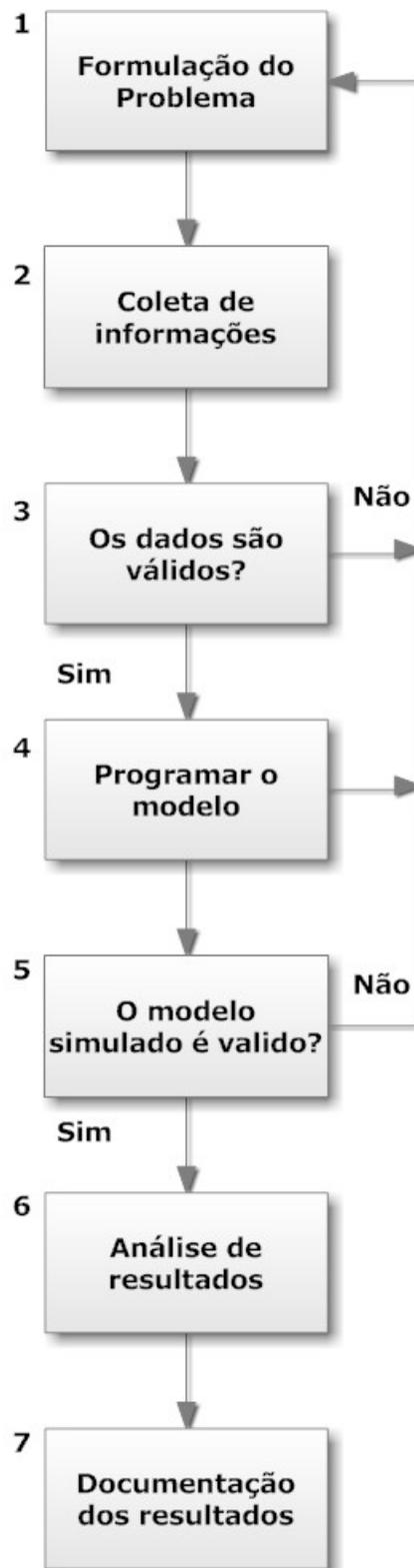


Figura 5.1: Sete Passos para Sucesso de um Estudo de Simulação (Fonte: LAW [2008])

5.3 Software de Simulação - Simul8

O SIMUL8 é, atualmente, um dos *softwares* de simulação com o maior número de licenças vendidas no mundo. Isto se deve, principalmente, ao seu preço de venda relativamente baixo e facilidade de uso. O desenvolvimento do SIMUL8 teve início na década de 1990, na Universidade de Strathclyde (Escócia), com a finalidade de ensino de simulação. Devido ao sucesso do programa como ferramenta de ensino de simulação, a Simul8 Corporation iniciou sua comercialização como ferramenta profissional para projetos de simulação. As Figuras 5.2 e 5.3 representam o ambiente de trabalho do *software* que é bastante amigável com o usuário.

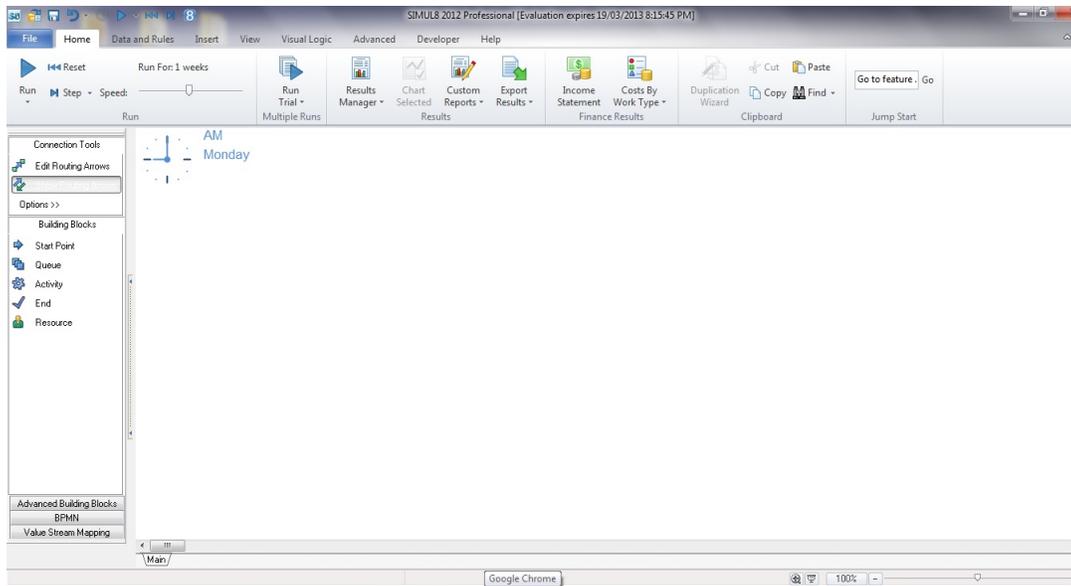


Figura 5.2: Ambiente de Trabalho do Simul8

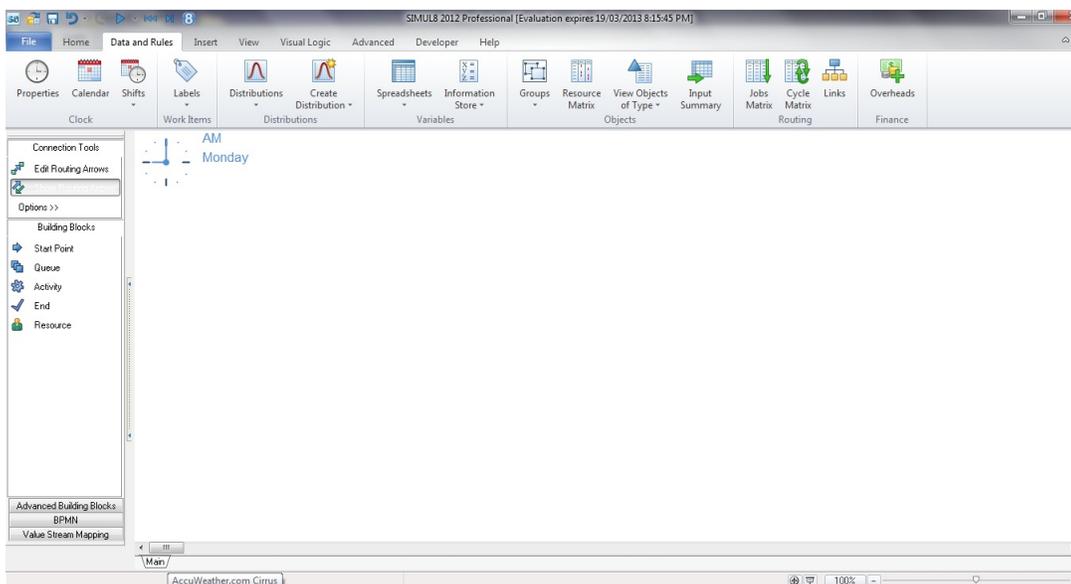


Figura 5.3: Ambiente de Simulação do Simul8

5.3.1 Modelo de Simulação

Assim como deve ser realizado em quaisquer problema de modelagem, diversas considerações foram realizadas no desenvolvimento deste modelo de simulação, as quais simplificam o modelo, mas não trazem prejuízos à fiel representação do sistema real. São essas considerações que definem de forma clara a fronteira entre o sistema e o ambiente de sistema. Algumas delas são citadas a seguir, enquanto outras serão mencionadas posteriormente por serem mais específicas a alguns momentos do trabalho.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi assumido que a disponibilidade de todos os recursos do sistema seja de 100%. Isso quer dizer que o modelo não leva em consideração possíveis quebras de equipamentos, falhas nos transportadores e elevadores, falta de material e eletricidade, acidentes de trabalho ou absenteísmo de funcionários. Esta decisão foi tomada uma vez que tais problemas acontecem de forma aleatória e, de certa forma, fogem ao controle dos tomadores de decisão do sistema. Além disso, não foi identificado que tais problemas ocorrem com frequência.

5.4 Simulação do Processo Manual

O modelo manual foi simulado utilizando o Simul8, o modelo foi concebido a partir de uma referência com o modelo real. O modelo de simulação segue a mesma sequência já apresentada na descrição do processo manual, Figura 5.4, em relação ao processo real, apresenta algumas simplificações que não agregam valor a simulação e serão descritos mais a diante.

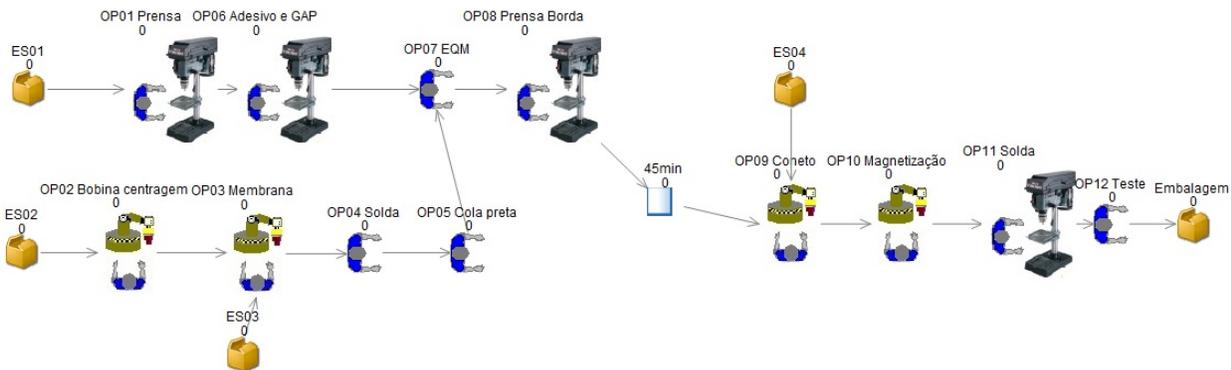


Figura 5.4: Modelo de Simulação manual

Para a simulação do processo manual, foram considerados alguns pré requisitos importantes:

- Não foram considerados as etapas do circuito magnético, já que são feitos em outra etapa da linha com um tempo de ciclo muito abaixo ao da linha;
- As distâncias entre postos e velocidade da esteira também não foram considerados, já que a esteira de move por passo e possui a mesma velocidade em todo o seu comprimento;

- A passagem do forno para secagem não foi considerado porque a operação não agrega movimentação, sendo apenas um transporte;
- A etapa dos 45 minutos foi replicada de forma coerente, já que interfere no tempo de atravessamento do produto;
- A inserção da malha na membrana também não foi considerada, já que a princípio a inserção era manual, mas posteriormente essa operação se tornou automática, reduzindo seu tempo de ciclo abaixo da linha e gerando estoque de membrana.

5.5 Simulação do Processo Automático

O modelo automático foi simulado também utilizando o Simul8, o modelo foi concebido a partir de várias considerações que serão descritas mais a diante. O modelo de simulação segue a mesma sequência já apresentado na descrição do processo e pode ser representado pela Figura 5.5.

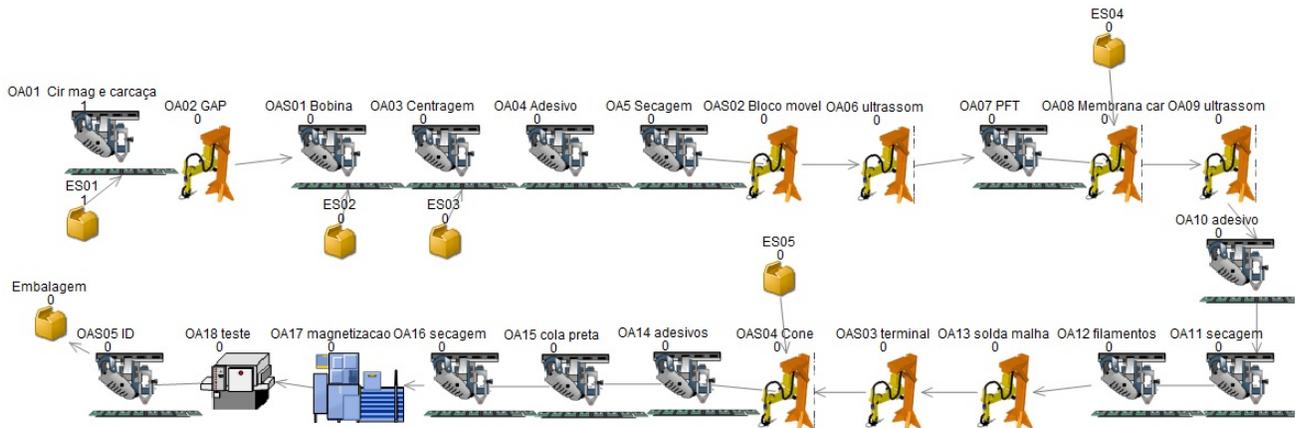


Figura 5.5: Modelo de Simulação automático

Para a simulação do processo automático, foram considerados alguns pré requisitos importantes:

- Tempo de *Warm up* de aproximadamente 45 min;
- Não foram considerados tempos de troca de material ou produto, ou seja, *setup* da linha, já que nosso objetivo é simular o quanto o novo processo é capaz de produzir em condições normais;
- Também não foram considerados possíveis falhas dos equipamentos. Probabilidade essa muito pequena, mas de toda forma deve ser considerada e descrita o porque da sua não utilização;
- Foram considerados entradas ilimitadas de matéria-prima, ou seja, o abastecedor virtual da linha sempre manteve os postos de estoques prontos e completos para o trabalho, o que também inclui os tanques de adesivos cheios.

Operação e Tempos	Operação e Tempos
OA01 - 3s	OA11 - 2,45s
OA02 - 3s	OA12 - 3s
OA03 - 3s	OAS03 - 3,3s
OA04 - 2,5s	OAS04 - 3,25s
OA05 - 2,45s	OA14 - 2,5s
OAS02 - 3,5s	OA15 - 2,5s
OA06 - 3,25s	OA16 - 2,45s
OA07 - 3,1s	OA17 - 2,85s
OA08 - 3s	OA18 - 3,2s
OA09 - 3,25s	OAS05 - 2,5s
OA10 - 2,5s	-

Tabela 5.1: Resumo de tempos do processo automático

- O tempo de simulação considerado foi de 57.600s, ou seja, 2 turnos de 8 horas diárias de trabalho, lembrando que como não temos operadores nos postos de trabalho, os turnos podem ser feitos de forma ininterrupta, o revesamento fica apenas para os abastecedores;
- Foram feitas 30 replicações para aumentar o intervalo de confiança da simulação. Isso significa que a partir do tempo acima definido, foram feitas 30 repetições da simulação.
- Os tempos dos processos automáticos são considerados constantes, Tabela 5.1, com distribuição uniforme e foram concebidos através de testes realizados na empresa, tempos fornecidos por fornecedores e na minoria dos casos pela experiência técnica.

Resultados

6.1 Processo Manual

Esta seção tem como objetivo discutir os resultados obtidos através da simulação, analisando os gráficos que nos fornecem três parâmetros de um processo manufaturado: tempo operando, tempo em espera e tempo bloqueado. O primeiro tempo é o quanto de fato o operador trabalhou durante ou não o tempo morto da máquina. O segundo item, refere-se ao tempo em que o posto de trabalho ficou parado, mas o operador ainda em operação, fora do ritmo natural ou do pré-determinado, ou seja, tempo ocioso ou de muito trabalho. Por último, o tempo bloqueado é o quanto a máquina ficou com o posto de trabalho cheio, esperando a liberação do posto seguinte para sequência da operação.

A primeira operação "OP01", apresenta um gráfico, Figura 6.1, com um comportamento não balanceado, ou seja, não otimizado. O gráfico representa que a operação está com um tempo apertado e o operador precisa realiza-la sem folga e em alguns momentos gera fila de matéria-prima, ou seja, um acúmulo no posto de trabalho, e por isso o sistema fica bloqueado, o material deveria entrar no posto, mas ele está bloqueado. A melhoria que poderia ser feita nesse posto, caso fosse necessário a diminuição do tempo de ciclo, seria a inserção de mais um operador para realizar a aplicação de cola e dessa forma dividir a operação.

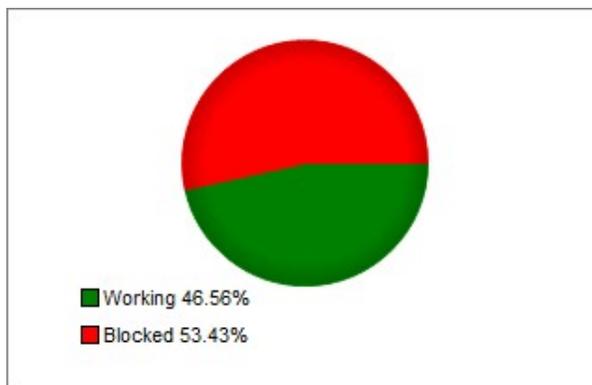


Figura 6.1: OP01 - Prensa do circuito magnético na carcaça

A operação "OP02" apresenta um comportamento parecido com o anterior, porém, com um

percentual menor de bloqueio e aparece com o surgimento de espera, caracterizado por uma operação de menor tempo entre outras duas de tempo maior, Figura 6.2. A sua otimização passaria pela melhoria dos métodos de MTM, já que a operação de inserção da bobina e centragem é feita no tempo morto da aplicação de adesivo na região anterior.

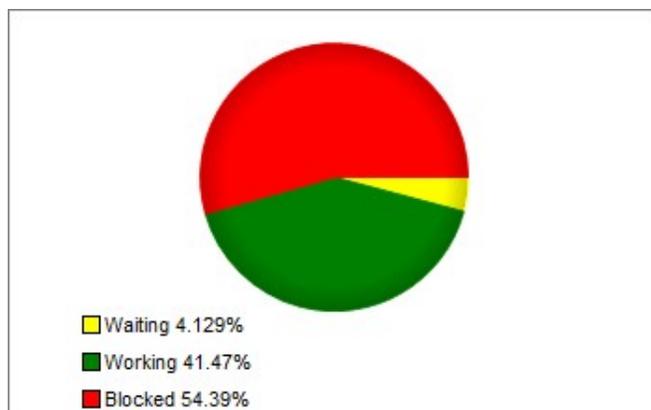


Figura 6.2: OP02 - Inserção da bobina e centragem

A terceira operação, "OP03" há um aumento considerável em relação ao tempo de trabalho e diminuição do tempo de bloqueio, Figura 6.3 já que ela possui um maior tempo de trabalho e dita o ritmo da região de trabalho e além disso, a operação é muito simples e não demanda muita habilidade e rapidez do operador, que também realiza a operação no tempo morto da aplicação de adesivo.

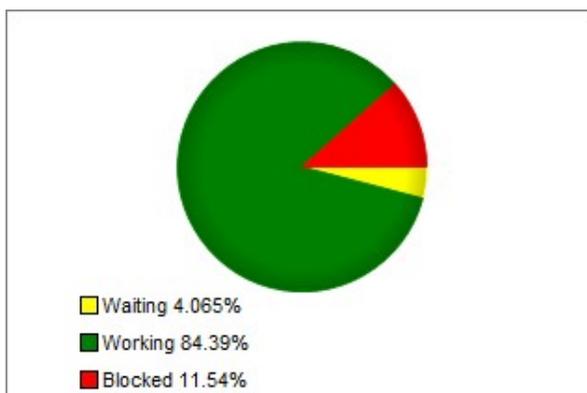


Figura 6.3: OP03 - Inserção da membrana

O quarto e quinto postos, "OP04" e "OP05" respectivamente, apresentam comportamentos com auto índice de espera, gerado pelo baixo tempo de trabalho em relação aos outros dois vizinhos. Isso acarreta um tempo de espera da etapa, já que sua realização é mais rápida e simples que as outras duas, Figura 6.4 e 6.5.

As operações "OP06" e "OP07" apresentam comportamentos semelhantes e já explicados na mesma linha de raciocínio anterior, para os postos com as mesmas características, Figura 6.6 e 6.7 respectivamente. Além disso, possuem um tempo cíclico muito parecido, naturalmente esperado o resultado. Apesar da primeira operação aparentemente estar com muita tarefa, sua

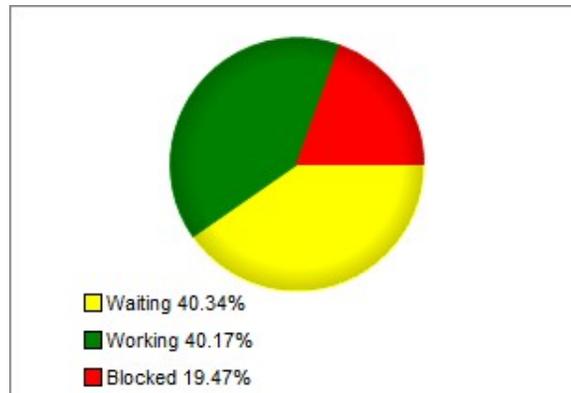


Figura 6.4: OP04 - Solda dos filamentos da membrana

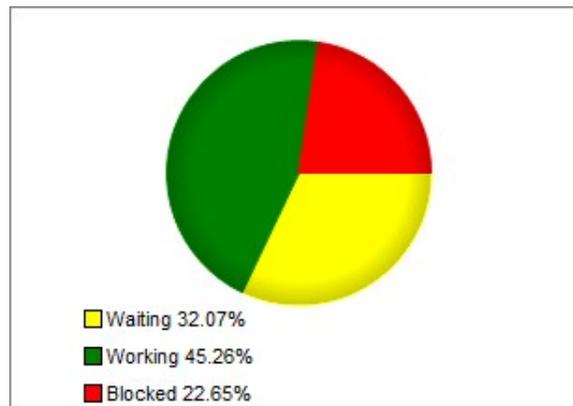


Figura 6.5: OP05 - Aplicação de cola preta

operação de limpeza é feita com uma mão e a inserção no berço para aplicação de adesivo com a outra, como as operação acontecem no tempo morto da aplicação, e essa por sua vez é o de maior tempo, o restante da operação fica dentro do ciclo final. A segunda operação, apesar de parecer simples, requer um detalhe no momento de inserir o bloco móvel e alinhar os filamentos com os terminais, por isso o seu tempo é elevado.

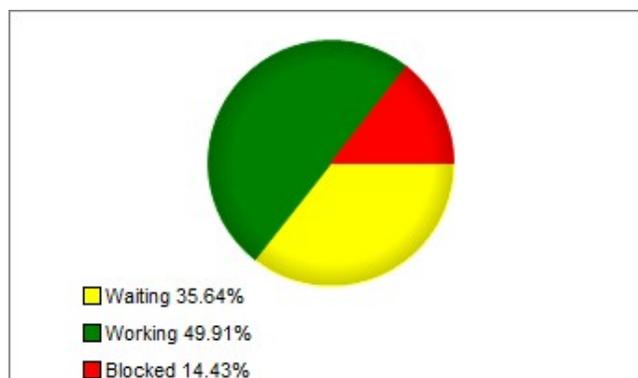


Figura 6.6: OP06 - Aplicação de adesivo na carcaça e limpeza do GAP

A operação "OP08" possui um comportamento que vale a pena discutir, porque ele recebe as

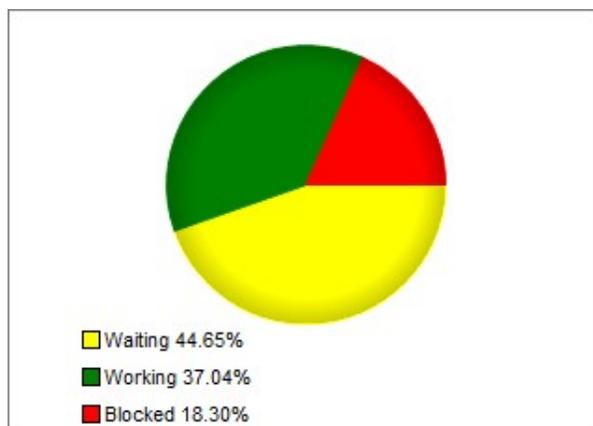


Figura 6.7: OP07 - Montagem do equipamento móvel

peças após um transporte com operação e sua saída é para um carro de espera, que comporta 120 peças, Figura 6.8. O maior problema do posto é o não alinhamento das peças no forno, ou seja, elas podem chegar fora do ritmo, tanto para mais ou para menos e para as primeiras peças a operadora demora um tempo maior para colocar as peças no carro, já que vazio os lugares ficam mais baixos e mais longes, ou seja, um tempo variável e não considerado.

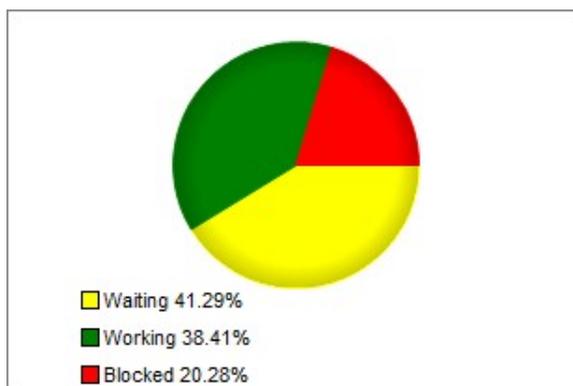


Figura 6.8: OP08 - Prensa da borda

A operação "OP09" assim como a anterior, possui entradas e saídas diferentes do restante. Sua entrada é após os 45min de espera para a cura do adesivo. Um ponto importante, descoberto nas simulações é que a entrada e saída de material depende muito do número de carros disponíveis. O ideal seria entre 6 e 7 carros para o estoque e transporte, caso esse número seja menor, pode haver falha na logística que é feito por um operador externo. Essa operação de inserção do coneto no conjunto também é feito no tempo morto da aplicação de adesivo.

A operação de magnetização, "OP10", possui o maior tempo da linha, porém, esse tempo não é causado pela operação de colocar o produto para ser magnetizado e sim em uma limitação no tempo de magnetização da máquina, Figura 6.10. Existe no mercado diversos dispositivos que realizam essa operação entre 3 e 4s, mas isso não seria ideal já que estaríamos trabalhando muito abaixo do ciclo total. Um outro ponto, é que trata-se de um maquinário mais antigo e sua regulagem de tempo cíclico não é muito trivial.

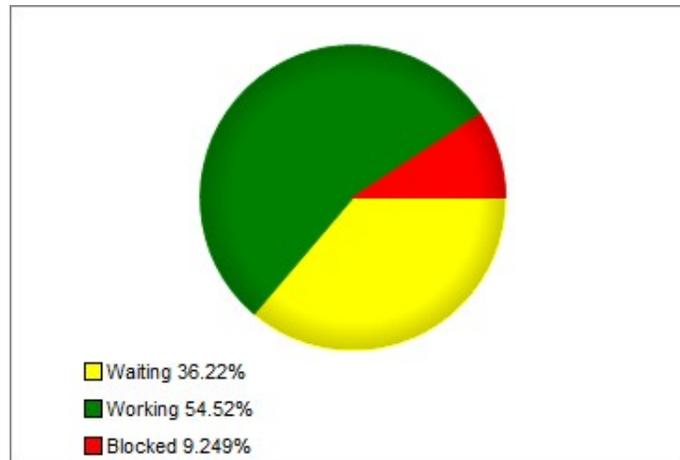


Figura 6.9: OP09 - Inserção do cone

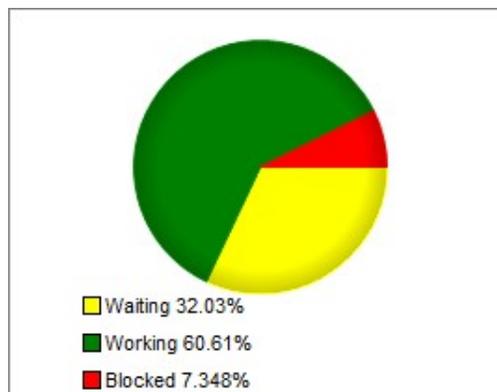


Figura 6.10: OP10 - Magnetização

A operação de solda semi-automática, "OP11" possui um elevado tempo de espera, já que o seu ciclo é menor que o anterior e por isso na maioria dos momentos é necessário esperar a peça chegar, muitas vezes fora do ritmo de produção. O tempo de operação poderia ser otimizado pela velocidade do cilindro de avanço e recuo, mas novamente, se esse tempo for muito reduzido, ele fica fora do tempo de ciclo total, Figura 6.11.

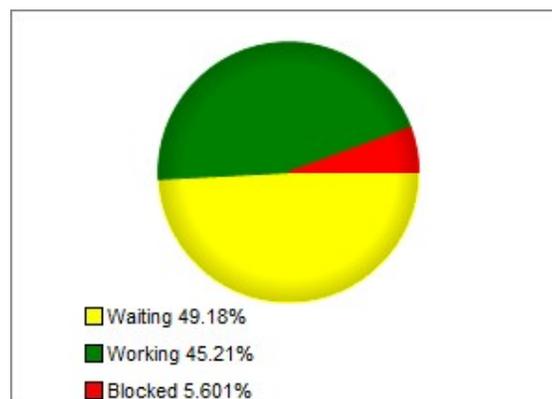


Figura 6.11: OP11 - Solda semi-automática

A última operação apresenta um tempo e comportamento esperados, já que se trata da última etapa e não tem um possível bloqueio para liberar a peça e o seu tempo de ciclo é menor que o anterior. Uma possibilidade de melhoria nesse posto seria o teste automático, o que reduziria apenas o tempo de varredura e não o tempo de inserção do conector no alto-falante, que é considerado o crítico desse posto.



Figura 6.12: OP12 - Teste acústico

6.2 Processo Automático

Essa seção tem como objetivo discutir os resultados da simulação do processo automático obtidos através da simulação, analisando os gráficos que nos fornecem três parâmetros importantes em um posto de um processo automático: tempo operando, tempo em espera e tempo bloqueado. O primeiro tempo é o quanto de fato a máquina operou durante um determinado tempo de simulação pré definido. O segundo item, refere-se ao tempo em que a máquina ficou parada, ou seja, tempo ocioso de trabalho. Por último, o tempo bloqueado é o quanto a máquina ficou com o posto de trabalho cheio, esperando a liberação do posto seguinte para sequência da operação.

As primeiras operações "OA01" e "OA02", apresentam em seus gráficos, Figuras 6.13 e 6.14, um comportamento muito parecido. Isso pode ser traduzido em operações com tempos iguais e menores que o tempo de operação subsequente, ou seja, em alguns momentos da simulação o posto ficou parado, esperando a liberação do posto seguinte.

A operação "OAS01" apresenta uma situação atípica, atrelado pela complexidade da operação, o que demanda um tempo maior de ciclo e por estar entre postos com tempo de operações menores que o seu. Isso significa que na maioria do tempo ele estará operando e podemos dizer que está em um estado de balanceamento otimizado, gráfico da Figura 6.15.

Em uma constante queda de tempo de ciclo, as operações "OA03" e "OA04" descrescem os seus ciclos, referentes a operação "OAS01", o que acarreta em um aumento no tempo ocioso de trabalho, ou seja, o posto fica parado esperando uma peça chegar em parte do tempo total, Figuras 6.16 e 6.17. Podemos dizer que os postos não estão balanceados, mas pelo menos se tratando da parte técnica, esses três postos devem permanecer nessa sequência de operação, já que faz parte do requisito mínimo para montagem do produto com qualidade.

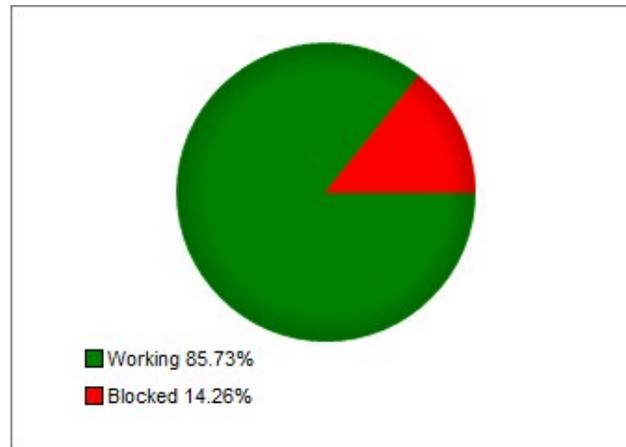


Figura 6.13: OA01 - Inserção do conjunto magnético na carcaça

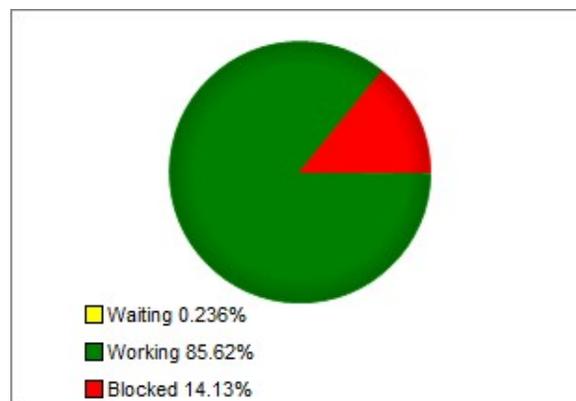


Figura 6.14: OA02 - Limpeza do GAP

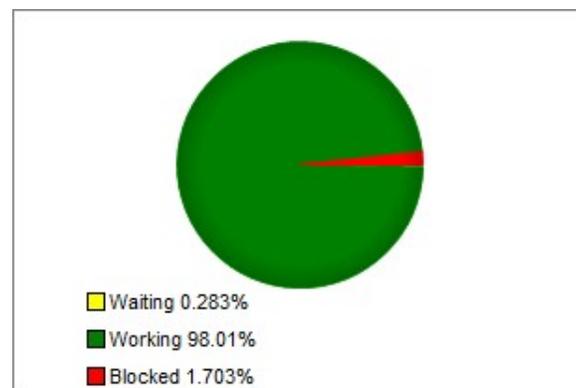


Figura 6.15: OAS01 - Inserção da bobina na giostra

Novamente temos um acréscimo de tempo no ciclo de operação logo após uma operação de ciclo baixo, operações "OA05" e "OAS02", respectivamente. A primeira uma operação rápida de aplicação de adesivo e a segunda uma operação com supervisão computacional que demanda um maior ciclo. Como descrito anteriormente, isso resulta em um maior tempo de espera da menor etapa e um posto otimizado no maior tempo, Figuras 6.18 e 6.19.

As operações "OA06", "OA07" e "OA08" apresentam situações bem parecidas, um pequeno

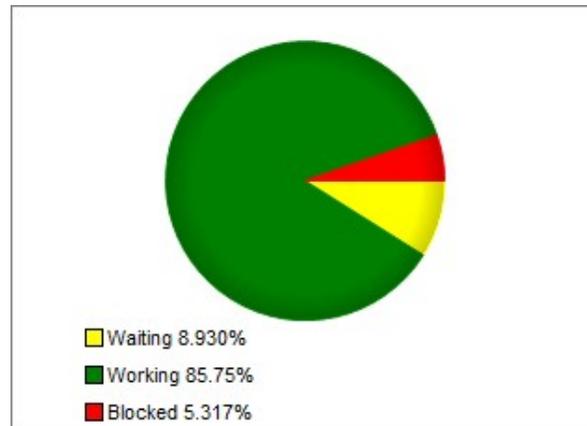


Figura 6.16: OA03 - Inserção da centragem na giostra

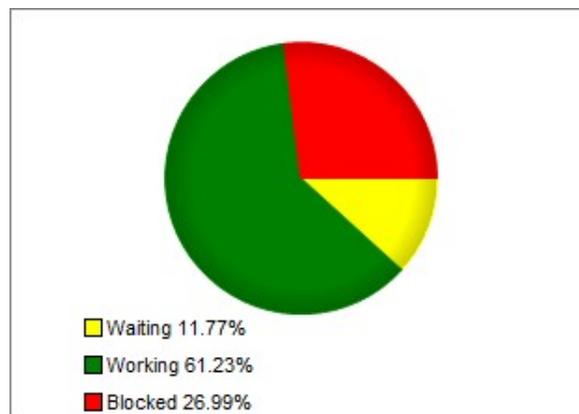


Figura 6.17: OA04 - Aplicação de adesivo

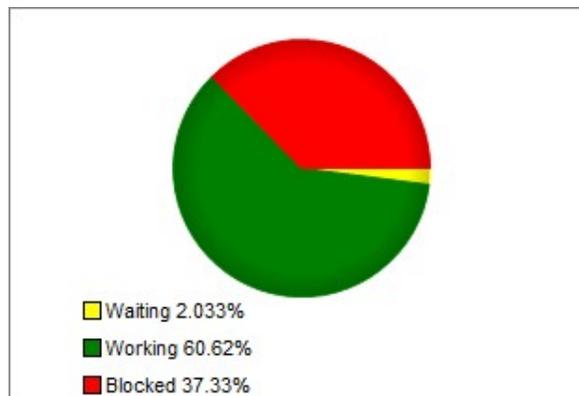


Figura 6.18: OA05 - Secagem do adesivo

percentual de espera, resultado de um menor tempo na operação seguinte e um outro pequeno percentual bloqueado, causado pelo mesmo motivo. O fato importante a ressaltar é que, novamente esses postos não podem ser modificados fisicamente, já que a soldagem deve ser feita necessariamente após a inserção do bloco móvel e antes da membrana, para não interferir no posicionamento perpendicular da bobina em relação ao GAP. As outras duas operações seguem

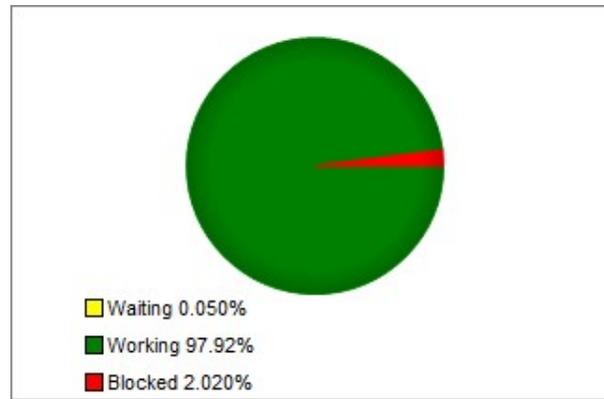


Figura 6.19: OAS02 - Inserção do bloco móvel

o mesmo raciocínio, representadas pelas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22.

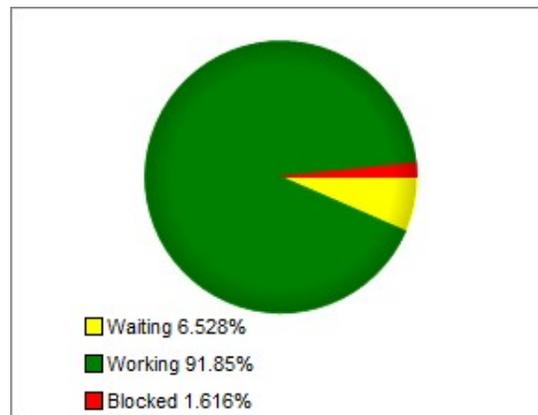


Figura 6.20: OA06 - Soldagem da centragem



Figura 6.21: OA07 - Inserção da malha na membrana

A operação "OA09" apresenta um outro comportamento diferente do restante. O gráfico da Figura 6.23 apresenta um baixo nível de espera e nenhum nível bloqueado. Isso significa que a próxima operação possui um tempo muito menor quando se comparado ao seu, o que permite uma folga entre as operações.

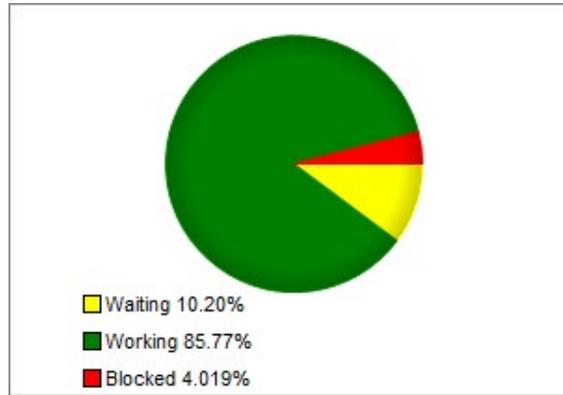


Figura 6.22: OA08 - Inserção da membrana na carcaça

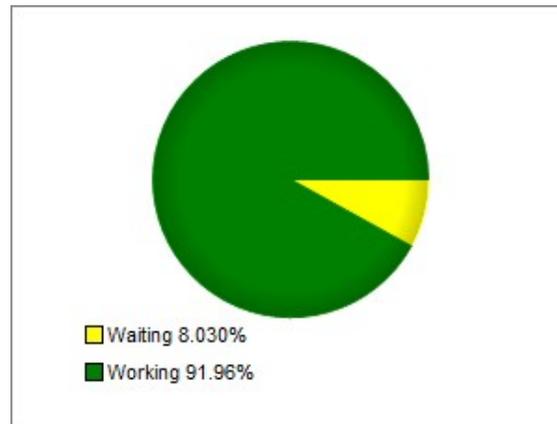


Figura 6.23: OA09 - Soldagem da membrana

As operações "OA10" e "OA11", representadas pelas Figuras 6.24 e 6.25, possuem um comportamento parecido na sua essência. Ambos possuem um grande tempo de espera e um baixo tempo bloqueado. Isso significa que ambos os tempos são bem menores do que os outros dois que envolve a sequência de postos e além deles nenhum tempo bloqueado, já que os tempos são parecidos. Novamente os postos não poderiam ser remodelados, já que necessariamente após a aplicação de adesivo deve ser feita a secagem do mesmo.

Os postos de trabalho "OA12", "OA13" e "OAS03", representados pelas Figuras 6.26, 6.27 e 6.28, também possuem características parecidas de comportamento. Isso é explicado pelo crescente aumento de tempo, mas sempre menos que o posterior. O que ocorre na maioria do tempo do posto em operação, mas com outra boa parte do tempo bloqueado ou em espera.

O posto "OAS04", Figura 6.29, possui a mesma explicação do posto "OA09", seguindo o mesmo raciocínio.

As operações "OA14", "OA15" e "OA16" apresentam praticamente um comportamento idêntico, já que as duas primeiras possuem o mesmo tempo de operação, exceto pela terceira operação que possui um tempo pouco maior que os dois anteriores e a operação seguinte possui um tempo maior, o que justifica o não aparecimento do tempo bloqueado nas duas primeiras e um pequeno índice no terceiro, Figuras 6.30, 6.31 e 6.32.

A operação "OA17" não é caracterizada como uma operação com movimentação, já que é uma

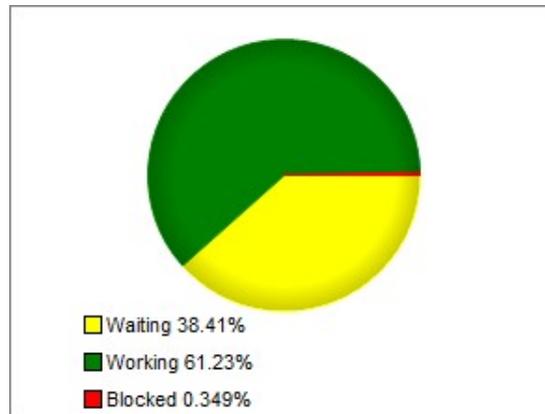


Figura 6.24: OA10 - Aplicação de adesivo

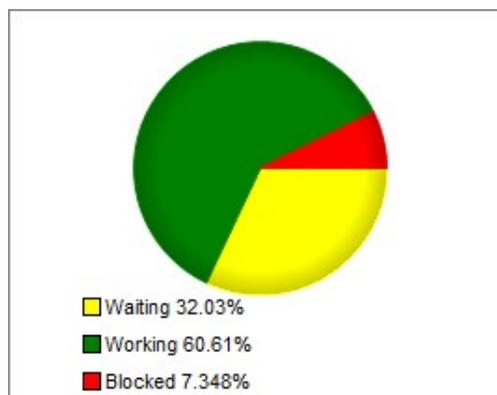


Figura 6.25: OA11 - Secagem do adesivo



Figura 6.26: OA12 - Posicionador dos filamentos

magnetização e o tempo de ciclo é baseado no tempo mínimo que o fornecedor do equipamento consegue realizar o ciclo completo. Posto esse que era um tempo crítico na linha manual e aqui passa a ser de certa forma irrelevante, Figura 6.33.

A operação "OA18" segue quase o mesmo padrão da etapa anterior, porém, além de um teste automático, ela depende da inserção do conector para realização do teste, o que agrega tempo de ciclo em um teste que é de aproximadamente um segundo, Figura 6.34.

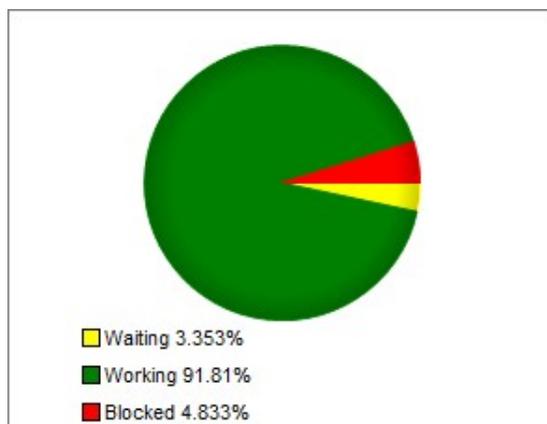


Figura 6.27: OA13 - Solda da malha



Figura 6.28: OAS03 - Inserção da malha no terminal



Figura 6.29: OAS04 - Solda da malha no terminal

A última operação refere-se a operação de identificação do produto por meio de uma aplicação de jato de tinta. Essa operação também é classificada como simples, já que sua ação é relativa rápida e não depende de muitos outros fatores, somente da supervisão que garante a qualidade do final do produto, dando um parecer de conforme ou não conforme, Figura 6.35.

Após o tempo de simulação, foram virtualmente produzidos 14.108 peças, com um tempo médio de atravessamento de 80,5s, tendo como máximo tempo de 84,14s e mínimo de 75,7s.

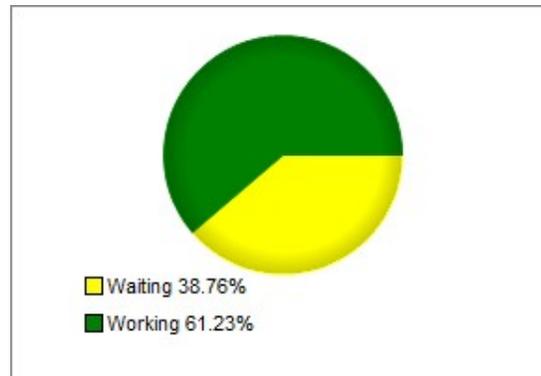


Figura 6.30: OA14 - Inserção do coneto

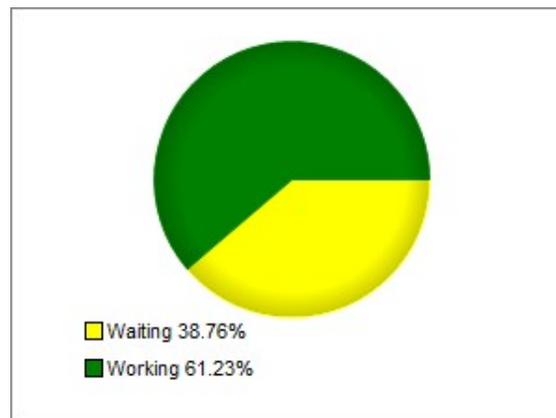


Figura 6.31: OA15 - Aplicação de cola preta

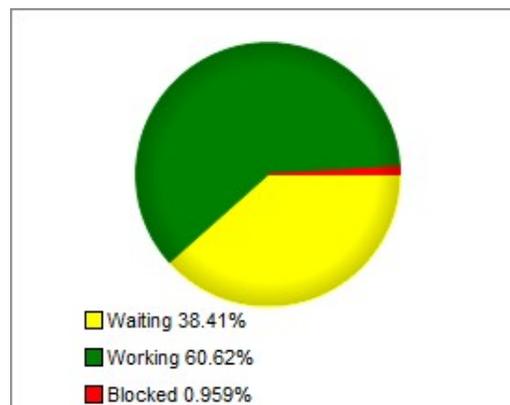


Figura 6.32: OA16 - Secagem do adesivo

Com esse resultado, podemos alcançar uma média de aproximadamente uma peça a cada 4s, ou seja, 15 ppm. Esse resultado já apresenta um aumento considerável na produção quando se comparado ao processo anterior, causado principalmente pela automação dos postos, o que acarretou na redução dos tempos de ciclo. A Tabela 6.36 representa o resumo dos tempos de operações, classificando-os nos três tipos citados anteriormente. Esse gráfico contém informações importantes de como o modelo pode ser otimizado e modificado, apesar de considerarmos essa

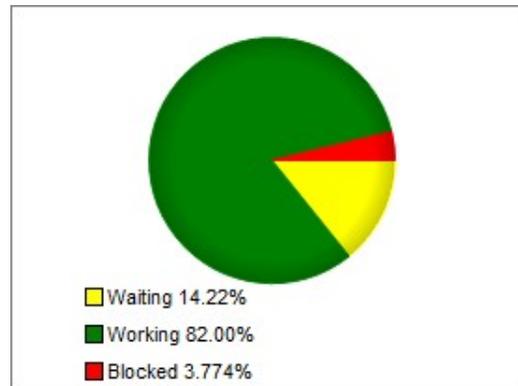


Figura 6.33: OA1 - Magnetização

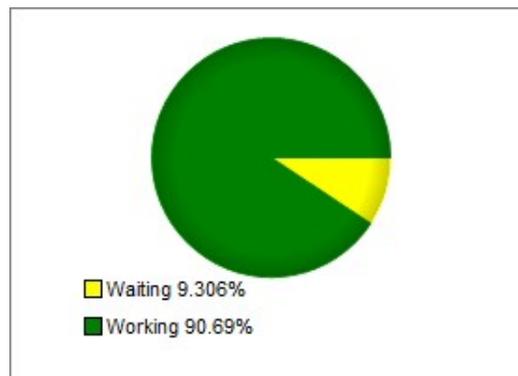


Figura 6.34: OA18 - Teste Acústico



Figura 6.35: OAS05 - Aplicação de jato de tinta e identificação

a nossa solução ótima para o nosso problema, já que contemplamos um projeto de relações financeira, técnica e produtiva.

6.3 Comparativo de Resultados

Durante as várias rodadas de simulação, foi muito importante comparar os resultados com o histórico da empresa, para verificar se o que estava sendo simulado era pertinente ao físico, tratamos isso como a validação do modelo. De certa forma, essa validação pode ser feita de

Activities

	Waiting %	Working %	Blocked %	Stopped %	Number Completed Jobs	Minimum use	Average use
OA01	0	85.732	14.268	0	14108	0	1
OA02	0.237	85.629	14.134	0	14108	0	0.998
OAS01	0.283	98.013	1.704	0	14108	0	0.997
OA03	8.931	85.752	5.318	0	14108	0	0.912
OA04	11.775	61.233	26.992	0	14109	0	0.882
OA05	2.034	60.627	37.339	0	14108	0	0.979
OAS02	0.05	97.929	2.021	0	14108	0	1
OA06	6.529	91.855	1.616	0	14107	0	0.934
OA07	9.687	88.169	2.144	0	14109	0	0.903
OA08	10.21	85.77	4.02	0	14108	0	0.896
OA09	8.031	91.965	0.004	0	14108	0	0.917
OA10	38.119	61.232	0.349	0	11108	0	0.623
OA11	32.035	60.616	7.349	0	14108	0	0.675
OA12	6.24	85.654	8.106	0	14108	0	0.939
OA13	3.353	91.813	4.834	0	14109	0	0.967
OAS03	4.422	93.091	2.487	0	14109	0	0.955
OAS04	8.249	91.751	0	0	14109	0	0.913
OA14	38.764	61.236	0	0	14108	0	0.618
OA15	38.766	61.234	0	0	14109	0	0.607
OA16	38.414	60.626	0.96	0	14108	0	0.622
OA17	14.225	82.001	3.774	0	14108	0	0.857
OA18	9.307	90.693	0	0	14108	0	0.908
OAS05	38.767	61.233	0	0	14108	0	0.608

Figura 6.36: Resumo dos tempos de operações do processo automático

várias formas, e a mais aprimorada é comparar os níveis de produção com o histórico da empresa, seguindo um mesmo nível de saída. Um grande ponto é que esse nível de produção pode ser um pouco alterado, devido a níveis variados de não conformidade no produto físico, não simulados

computacionalmente. Esse problema é contornado colocando-se um intervalo de confiança para a simulação, em que a variação entre uma rodada de simulação e outra não interfira no comparativo com a realidade. Para o processo automático, como não foi implantando fisicamente, essa validação acontece baseada em parâmetros de volume e principalmente no tempo médio de cada ciclo do processo.

Após simular ambos processos, podemos perceber algumas diferenças claras entre os modelos de simulação. A princípio, foi comparado o número de operadores, postos automáticos, entradas de estoque, transporte externo e com operação, o Gráfico 6.37 representa a descrição anterior. Obviamente o número de operadores diretos de um processo automático será zero, enquanto o processo manual possui 12 operadores trabalhando diretamente na linha de produção. Essa redução possui grande vantagem em alguns aspectos, como: redução do custo com mão-de-obra, redução no índice de refugo por montagem fora do conforme e falta perícia do operador, aumento da confiabilidade do produto e redução do número de treinamentos e engargos sociais, o que impossibilita uma flexibilidade do processo.

O segundo item comparado foi o de número de operações automáticas. No processo manual esse número é zero, porém, seria um ponto a ser estudado para implementar alguns postos automáticos para redução de custos, baseados na sequência descrita anteriormente. Já o número de operações automáticas no segundo processo é esperado e altamente desejado. Um outro fator não menos importante é o número de estoque externo, que nesse caso permanece igual para ambos os casos.

Os dois últimos itens são os números de transporte externo e com operações. O processo manual possui quatro operações nesses dois modelos e o processo automático, nenhuma. A grande vantagem da redução desses números é a economia em logística interna de transporte interno de materiais e carros com estoque e materiais, o que economiza também indiretamente o número de operadores.

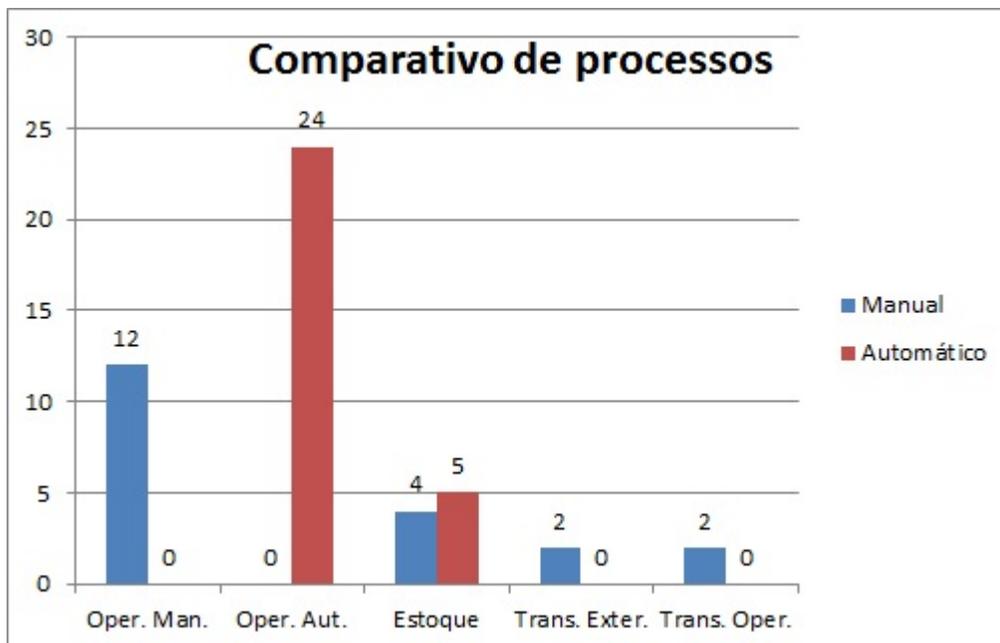


Figura 6.37: Comparativo de modelos por números de operadores e operações automáticas

O Gráfico 6.38 representa a diferença entre o tempo de *setup* das duas linhas e o ciclo de peças de cada uma. A primeira avaliação é clara, no processo atual, toda a troca de ferramentas para diferentes produtos é feita por operadores e líderes de linha, essa operação gira em torno de vinte minutos, dependendo do grau de complexidade e de recursos disponíveis. Já em um processo automático o projeto deve ser pensando para realizar essa parametrização de forma automática, ou seja, dentro de um banco de dados deve conter informações relevantes sobre esse posicionamento, que devem ser configuradas de acordo com o código do produto. Ao selecionar uma referência, todos os parâmetros são automaticamente ajustados, em um tempo mínimo que pode chegar abaixo de um minuto. Essa diferença em *setup*, pode ser traduzida em redução de recursos de operadores para a troca e um tempo maior em produção.

Quanto ao tempo da linha, foi possível obter uma redução enorme, o que impacta obviamente na produtividade da linha. Todo esse ganho comporta os volumes produtivos que são esperados, porém o grande problema que precisa ser analisado com mais cautela é se a própria empresa comporta um aumento de produção dessa ordem, ou seja, se está preparada para aumentar o setor de logística, produção, especializar a manutenção. Esses dados comprovam o poder da otimização de um processo automático, porém, em uma avaliação mais ampla não é capaz de responder, se de fato, essa melhoria é a mais econômica, e muito além disso, o quão econômica ela será a longo prazo, tomando como referência todos os setores da empresa que possam ser impactados por essas mudanças. O Gráfico 6.39 representa esse aumento de peças diárias, o que resta é ter certeza da possibilidade de crescimento e da gestão do mesmo, já que ele não ocorre de forma repentina e sim de uma forma lenta, até que todo o processo seja completamente projetado, construído, instalado e testado.

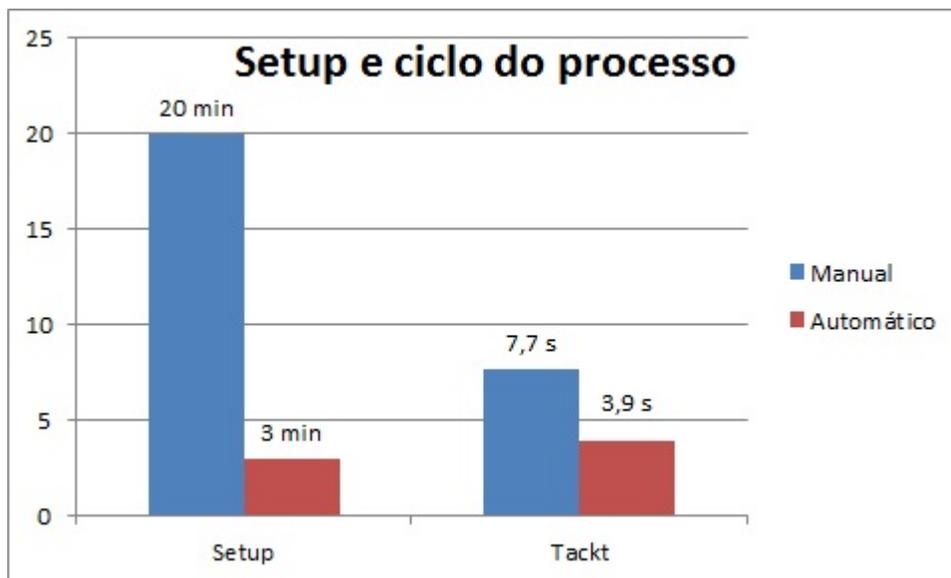


Figura 6.38: Comparativo de modelos por tempo de setup e ciclo

Um outro detalhe importante na medida de desempenho do processo pode ser considerado gráfico da Figura 6.40, ou seja, quanto tempo o produto passa pela linha de produção. No processo manual, temos além dos tempos de processos, o tempo de cura da cola, 45 minutos, e mais os transportes externos. No novo projeto, consideramos os tempos padrões e com mínima



Figura 6.39: Comparativo de modelos por produção diária

variação, já que o processo é praticamente uniforme e não mais com cura de adesivos. A redução nesse tempo permite também o aumento da produtividade e um menor tempo de resposta em relação a pedidos feitos por fornecedores.

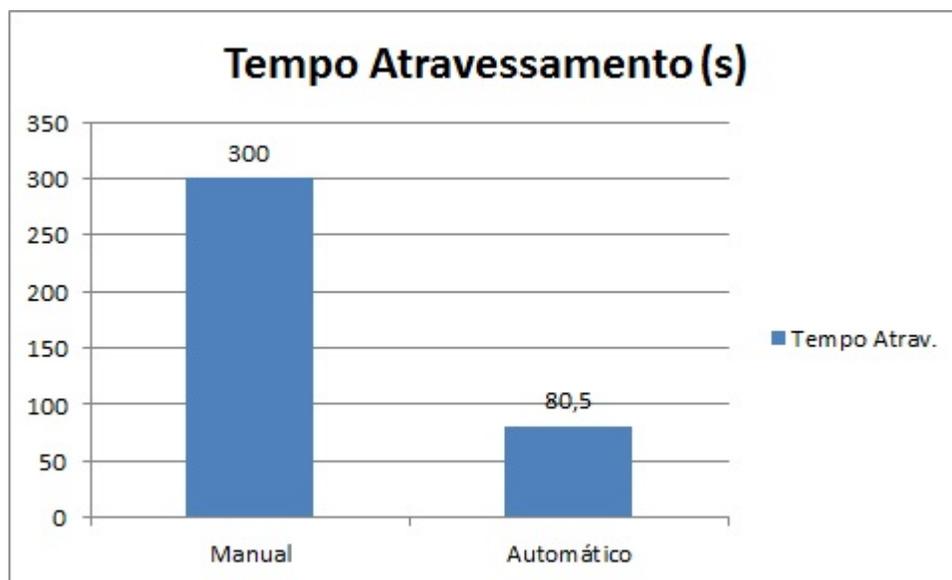


Figura 6.40: Comparativo de modelos por tempo de atravessamento

Conclusões e Perspectivas

7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas e as recomendações para futuros trabalhos, apresentando os resultados obtidos com a aplicação das ferramentas propostas linha de manufatura, as contribuições fornecidas com a elaboração deste trabalho e propondo sugestões para futuros trabalhos em aprimoramento de processos.

7.2 Conclusões e Contribuições do Trabalho

Apesar do escopo amplo deste trabalho, a elaboração do mesmo permitiu uma análise bastante completa e detalhada do funcionamento de uma linha de produção de uma fábrica de alto-peças. Uma vez que a fábrica toda está interligada pôde-se através da análise crítica e vislumbrando melhorias no processo, obter uma visão dos principais desafios existentes como um todo e de como estes são tratados na prática, principalmente quando tratamos de inovação tecnológica.

Como a linha automática não foi aprovada, por fatores econômicos, e mesmo que aprovada posteriormente, sua análise ficará para futuros trabalhos. Apesar disso, grandes possibilidades e cenários foram descobertos com a linha semi-automática, e foi possível constatar, mesmo que não descrito no projeto, que existem outras possibilidades que atendam sempre a um equilíbrio entre orçamento e demanda.

Foi possível aprender que a organização de uma linha de produção é de extrema complexidade e envolve uma enormidade de fatores. O monitoramento e controle de gargalos é de grande importância uma vez que limita a produção total da fábrica e impede que melhorias em outros setores reflitam em um aumento da produção. Por isso, entendo que os métodos de simulação desenvolvidos no trabalho podem permitir um acompanhamento mais de perto, com melhorias constantes, simuladas computacionalmente, representando de forma realista uma linha de produção, permitindo a análise de cenários de forma rápida e com relativa facilidade.

Porém a maior contribuição deste trabalho foi a possibilidade de simular e otimizar uma linha que ainda não existe na prática por se tratar ainda de um projeto.

- O modelamento do processo utilizando um *software* comercial permitiu a construção de dois modelos de produção, gerando gráficos necessários para tomada de decisões;
- A visualização da linha de uma forma dinâmica facilita o entendimento do processo e ajuda a identificar problemas de *layout*, fluxo e até mesmo operações;
- A precisão dos resultados obtidos auxilia a melhorar a qualidade de todos os outros estudos em sequência;
- A possibilidade de alterar qualquer variável do modelo em pouco tempo e, principalmente, sem custo adicional com mudanças em *layout*;
- Redução drástica do tempo de *setup*, imprescindível no mercado atual.

No momento de crescimento da empresa e da implantação de uma nova linha de produção, é fundamental que o projeto aconteça conforme planejado, pois os estudos de viabilidade econômica e principalmente os compromissos com clientes dependem desse acerto. Por isso, a aplicação da simulação na fase de planejamento do projeto auxilia na redução de graves erros de projeto, como já mencionado anteriormente. Esta redução beneficia a empresa no momento da implantação do projeto reduzindo o tempo necessário para o bom e correto funcionamento da linha, eliminando assim os desperdícios de tempo com testes práticos que podem ser substituídos por análises ainda na fase de projeto através das ferramentas utilizadas neste estudo.

Ao final do trabalho, foi possível responder a hipótese que circulou durante o mesmo, um processo automático é sempre mais produtivo que um processo manual? É mais viável economicamente, vale o investimento? Porque automatizar? As respostas não são simples e precisam ser avaliadas sempre em conjunto com "n" outros fatores. Tanto a primeira pergunta, quanto a segunda, devem ser analisadas com perícia, já que deve-se avaliar os vários cenários e variáveis de um projeto de automação. Tínhamos em alguns momentos quatro ou cinco soluções, mas ainda assim não eram suficientes para atender a demanda econômica. Além disso, mesmo que atenda o valor do investimento, é preciso ter plena certeza de quanto tempo esse será retornado para empresa, ou seja, o *payback* é muito importante para as tomadas de decisões. Investimentos da ordem de três anos de horizonte, na maioria dos casos não são aceitos, baseado em um tempo longo para retorno do investimento feito, amortização dos equipamentos e tecnologia obsoleta. A terceira pergunta é a mais trivial de se responder, isso porque além do aumento da produtividade, você consegue melhorar a qualidade do produto, aumentar a flexibilidade da linha de produção, reduzir tempos de *setup*, tempos de atravessamento, número de operadores e consequentemente os gastos com encargos. Do outro lado, podemos ter um aumento da mão-de-obra especializada e maiores gastos com manutenção preventiva, além de toda uma estrutura em departamentos da empresa para receber a melhoria.

7.3 Adequação com os Objetivos propostos

A proposta inicial do trabalho foi realizar a simulação computacional na fase de projeto do processo para melhoria da produtividade e redução de custos, por exemplo: redução do tempo de

setup, tempo de atravessamento, aumento na qualidade das peças, aumento da produtividade e eficiência. Esses pontos foram plenamente atingidos, quanto aos objetivos secundários podemos destacar:

- Mapear o processo da linha de produção: Foi possível mapear todo o processo produtivo manual e inserir na simulação apenas o que julgamos necessário para uma representação confiável do modelo, além disso, tivemos a oportunidade de mapear vários modelos de linhas, semi-automáticas e automáticas.
- Conhecer a produtividade da linha: Esse objetivo fica um pouco fora de contexto quando falamos do processo manual, porque já possuímos todos os históricos de produção da linha, o que de fato foi feito, foi comparar as respostas e verificar se eram compatíveis, de certa forma, a validação dos dados, baseados em históricos da produção. A vantagem no geral foi que conseguimos visualizar uma previsão de volume para ser produzido e simulando as operações foi possível determinar se seria capaz de atender as demandas.
- Identificar possíveis gargalos de produção: o grande fato relevante desse tópico é que a solução para pequenos gargalos não resolveria o problema de uma forma geral e sim pontualmente. Por isso, foi pensando em uma solução de maior complexidade para que fosse possível atender as demandas de volume. Os problemas pontuais e de processo são tratados internamente como forma de pequenas melhorias e só podem impactar em pequenos tempos, ajustes e economias.
- Propor automação: Após a identificação de que mudanças pontuais no sistema não seriam suficientes, vários modelos foram propostos para se chegar em um modelo otimizado e automático, lembrando que demais considerações foram feitas a esse respeito do processo ser totalmente automático.
- Definir melhor regime de operação: O melhor regime de operação foi definido após vários testes e simulação de diferentes modelos, com tempos e custos variáveis.
- Validar modelo automatizado: única etapa que não foi possível completar, já que o modelo automático inicialmente pensando não foi de fato implantado, mas essa opção fica como futuros trabalhos. Apesar disso, uma validação simples pode ser feita, levando em consideração os tempos previstos e a necessidade da empresa em aumentar o seu volume produtivo e não somente o tempo cíclico de trabalho.
- Comparar modelos: Após a simulação de ambos os processos, foram feitas comparações nos mais importantes níveis de descrição do processo. O que serviu para visualizar melhor as reais diferenças entre os modelos.

7.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Foi possível identificar vários assuntos que podem ser abordados em trabalhos futuros, como propostas de novas melhorias, feitas por outras pessoas da empresa, iniciando até outros trabalhos como este:

- Após a construção do projeto da linha semi-automática, fazer novas simulações para verificar o aumento da produtividade em questão;
- Utilizar da simulação para novas versões de linhas automáticas, em conjunto com a necessidade da empresa, para melhor convencimento de investidores do grupo;
- Possibilidade de pequenas melhorias, dentro de orçamentos, da nova linha implantada.
- Realizar a mesma simulação e estudo de viabilidade para outras linhas de produção da empresa, por exemplo, antenas e cabos.

7.5 Considerações Finais

O presente trabalho utilizou de técnicas de simulação computacional para simular e otimizar uma linha de produção em fase de projeto. O desenvolvimento deste trabalho mostrou que a aplicação das técnicas de otimização não é uma tarefa trivial e requer um conhecimento amplo e em conjunto, tanto de todos os setores da fábrica, quanto de pessoas externas envolvidas. Outra questão é a veracidade dos dados de entrada, ou seja, um bom mapeamento do processo é fundamental para o sucesso do projeto, pois somente dessa forma é possível conhecer em detalhes todo o processo de manufatura.

Algumas metodologias e paradigmas foram rompidos e podemos citar alguns pontos que se destacaram ao longo do projeto:

- Vizualização do processo de uma forma dinâmica;
- Confiança nos dados de entrada;
- Facilidade para análise dos dados e flexibilidade para mudança;
- Variações em propostas de melhorias.

Uma consideração importante que foi observado durante toda a execução do projeto, foi a total integração das áreas do curso de mecatrônica, não somente das áreas previamente definidas. Para exemplificar a amplitude do processo podem ser citadas as áreas de controle, processo, produção, mecânica, elétrica e administração. Na área de controle, tem-se a modelagem de todo o processo manual e automático, além do controle das temperaturas dos dispositivos serem feitas através de controladores PI e PID, vistos durante o curso. A parte de processo, foi responsável pelo mapeamento, novamente, de ambos os processos, para entender os mecanismos de construção de um produto ao longo de um processo produtivo, coisa que até então era desconhecida, já que não foi abordado durante a graduação. A etapa de produção foi de grande importância para tratar os dados e informações retirados do processo manual, dados esses, de suma importância para compreender os tempos de ciclos e do processo como um todo, essenciais para o projeto de um novo processo automático. Da área de mecânica foi possível extrair muita informação e atrelar aos conhecimentos aprendidos durante a graduação de uma maneira abrangente. De grande importância, essa área foi responsável pelos estudos nas tolerâncias de processo, que

aferiam a qualidade, para o projeto como um todo, além disso, o projeto e construção de todos os dispositivos que foram prototipados e testados. Ainda sim, o estudo dimensional de *layout* na fábrica e dos postos de trabalho, o que inclui ergonomia do posto, acionamento pneumático, hidráulico, mecânica dos fluidos e parte estrutural de perfis. A parte de elétrica, a menos utilizada, mas não menos importante, serviu de base para compreender o funcionamento dos motores utilizados nos manipuladores cartesianos, bem como dimensionamento de motores, por exemplo da giostra. Além disso, conceitos de sistemas de visão computacional foram detalhados para serem implantados de forma integrada com o processo mecânico. Por último, a parte administrativa que foi responsável pela gestão de todas as outras competências e pelo alinhamento na parte de viabilidade econômica do projeto com a realização do mesmo. Dessa forma, foi possível a importância que o profissional com a formação de um engenheiro Mecatrônico tem para o mercado, já que devido as duas competências, é possível visualizar e tratar de assuntos muitas vezes específicos de uma determinada área. Por outro lado, a importância do projeto para um estudante graduando em Mecatrônica, já que foi possível verificar e esgotar todos os conceitos citados acima, de forma a integralizar ideias e soluções para melhorias em processo.

Ao final do projeto e após conceber um projeto automático, pode-se concluir que foi gerada uma solução viável a longo prazo, ou seja, em dois ou três anos todo o benefício convertido em produtividade seria revertido em lucro para a empresa. Assim, temos um aumento na produtividade, redução na mão-de-obra operária, aumento na qualidade e confiabilidade do produto, redução no tempo de *setup*, redução no número de refugo de peças e controle flexível da demanda. Por outro lado, vale ressaltar que sempre há o ônus do projeto, que demandará de uma mão-de-obra qualificada e especializada para operar os maquinários, manutenção preventiva controlada, maior investimento e maior risco, e maior tempo para construção e depuração.

Bibliografia

- A. AGUIRRE, E. MULLER, and S. SEFFINO. Applying a simulation-based tool to productivity management in an automotive-parts industry. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2008.
- J. BANKS. Introduction to simulation. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2000.
- J. BANKS, J. S. CARSON, B. L. NELSON, and D. NICOL. *Discrete-event system simulation*. 4th ed - Prentice-Hall, 2005.
- J. R. N. BRIGHENTI. Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto. 2006.
- C. G. CASSANDRAS and S. LAFORTUNE. *Introduction to Discret Event Systems*. Second Edition - Springer, 2008.
- L. CHWIF and A. C. MEDINA. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos*. 3ª Edição, 2010.
- V. DICKASON. *The Loudspeaker Design Cookbook*. 7th Edition, 2006.
- R. N. Duarte. Simulação computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças. *Dissertação de Pós Graduação em Engenharia de Produção*, 2003.
- C. R. HARREL, B. K. GHOSH, and R. BOWDEN. *Simulation Using ProModel®*. McGraw-Hill, 2000.
- P. KIRCHHOF, N. MESETH, and T. WITTE. Simulation based evaluation of the workload control concept for a company of the automobile industry. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2008.
- A. M. LAW. How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2008.
- R. M. MEDINA and S. F. CRISPIM. Fatores determinantes no processo de decisão de investimentos em robotização na indústria brasileira de autopeças. *Gest. Prod., São Carlos, v. 17, n. 3*, 2010.

- D. C. MONTGOMERY and G. C. RUNGER. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4ª Edição, 2009.
- J. R. ROSÁRIO. *Princípios de Mecatrônica*. Pearson Prentice-Hall, 2005.
- J. SHALLER. Scheduling a flow line manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *European Journal of Operational Research*, 2000.
- E. L. SIVLA and E. M. MENESES. *Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. Florianópolis, 2005.
- N. SLACK, S. CHAMBERS, and R. JOHNSTON. *Administração da Produção*. 3ª Edição, 2009.
- C. S. TAHARA, M. M. CARVALHO, and E. V. GONÇALVES. *Revendo a bibliografia recente sobre a formação de células de manufatura*. Gramado:17 ENEGEP, 1997.
- C. S. S. VILLELA. Mapeamento do processo como ferramenta de reestruturação e aprendizagem organizacional. *Dissertação de mestrado - UFSC*, 2000.
- K. YASUDA and Y. YIN. Dissimilarity measure for solving the cell formation problem in cellular manufacturing. computers e industrial engineering. *Volume 39 Elsevier Science*, 2001.

Apêndice A

8.1 Tempos do Processo Manual

APLICAR ADESIVO NO CIRCUITO MAGNÉTICO E MONTAR SOBRE CARÇAÇA		
Tempo	Ritmo	Campo14
5.3	65	5.742
5.7	60	5.700
5.6	60	5.600
6.2	55	5.683
6.2	55	5.683
6.4	55	5.867
5.9	55	5.408
6.5	55	5.958
5.7	60	5.700
5.8	60	5.800
6.3	55	5.775
5.5	60	5.500
6.1	55	5.592
5.9	55	5.408
5.5	60	5.500
5.4	60	5.400
6	55	5.500
5.9	55	5.408
5.5	60	5.500
6.1	55	5.592

Figura 8.1: Tempos - Operação Manual 01

MONTAR BOBINA E CENTRALIZADOR NA MASCARA E APLICAÇÃO DE ADESIVO		
Tempo	Ritmo	Campo14
4.9	55	4.492
4.5	60	4.500
4.7	60	4.700
4.1	65	4.442
4	65	4.333
4.6	60	4.600
4.5	60	4.500
4.1	65	4.442
4.9	55	4.492
5.2	55	4.767
4.3	65	4.658
4.5	60	4.500
4.4	60	4.400
4.1	65	4.442
5.1	55	4.675
4.5	60	4.500
4.4	60	4.400
5	55	4.583
4.6	60	4.600
4.3	65	4.658

Figura 8.2: Tempos - Operação Manual 02

INSERÇÃO DE MEMBRANA APLICAÇÃO DE ADESIVO E POLIMERIZAÇÃO		
Tempo	Ritmo	Campo14
5.1	60	5.100
4.7	60	4.700
5	60	5.000
5.3	55	4.858
4.4	65	4.767
4.5	65	4.875
4.9	60	4.900
5.3	55	4.858
5.1	60	5.100
5.3	55	4.858
4.7	60	4.700
5	60	5.000
4.8	60	4.800
4.6	65	4.983
5.1	60	5.100
4.6	65	4.983
4.8	60	4.800
5	60	5.000
5.3	55	4.858
5.2	55	4.767

Figura 8.3: Tempos - Operação Manual 03

SOLDAR FILAMENTOS DA BOBINA NA MALHA		
Tempo	Ritimo	Campo14
4.2	65	4.550
5	55	4.583
4.5	60	4.500
4.7	60	4.700
4.5	60	4.500
5.2	55	4.767
4.2	65	4.550
4.9	55	4.492
4.5	60	4.500
4.1	65	4.442
4.4	60	4.400
4.3	65	4.658
4	65	4.333
4.7	60	4.700
4.5	60	4.500
4.8	60	4.800
4.9	55	4.492
4.2	65	4.550
4.6	60	4.600
4.7	60	4.700

Figura 8.4: Tempos - Operação Manual 04

APLICAÇÃO DE ADESIVO SOBRE MALHA		
Tempo	Ritimo	Campo14
6.1	55	5.592
4.8	65	5.200
5.3	60	5.300
5.5	60	5.500
5.8	55	5.317
5.5	60	5.500
4.5	70	5.250
5.1	65	5.525
5.4	60	5.400
5.3	60	5.300
5.2	60	5.200
5.5	60	5.500
5.4	60	5.400
5	65	5.417
5.8	55	5.317
5.4	60	5.400
5.6	55	5.133
5.2	60	5.200
5.3	60	5.300
5.5	55	5.042

Figura 8.5: Tempos - Operação Manual 05

POSICIONAMENTO DO GUIA E APLICAÇÃO DE ADESIVO NA CARÇAÇA		
Tempo	Ritimo	Campo14
5.7	60	5.700
5.4	60	5.400
6.1	55	5.592
5	70	5.833
5.6	60	5.600
6.3	55	5.775
5.7	60	5.700
6.4	50	5.333
6	55	5.500
5.7	60	5.700
5.4	65	5.850
5.1	69	5.865
5.7	60	5.700
5.4	65	5.850
5.1	65	5.525
5.7	60	5.700
6.3	55	5.775
5.2	65	5.633
5.5	60	5.500
6.5	50	5.417

Figura 8.6: Tempos - Operação Manual 06

MONTAGEM DO EQUIPAMENTO MÓVEL NA CARÇAÇA		
Tempo	Ritimo	Campo14
5.8	60	5.800
5.6	60	5.600
5.2	65	5.633
6.2	55	5.683
6	55	5.500
5.9	60	5.900
5.4	65	5.850
5.8	60	5.800
6.1	55	5.592
5.9	60	5.900
5.5	65	5.958
5.1	65	5.525
5.8	60	5.800
5.3	65	5.742
4.9	70	5.717
5.8	60	5.800
5.6	60	5.600
5.3	65	5.742
5.7	60	5.700
5.4	65	5.850

Figura 8.7: Tempos - Operação Manual 07

PRENSAR BORDA DO ALTO-FALANTE		
Tempo	Ritimo	Campo14
3.8	60	3.800
3.7	60	3.700
4.2	55	3.850
3.9	60	3.900
3.5	65	3.792
3.8	60	3.800
4.5	50	3.750
3.5	65	3.792
4	55	3.667
3.9	60	3.900
3.7	60	3.700
4.1	55	3.758
4.4	55	4.033
3.9	60	3.900
4	55	3.667
3.7	60	3.700
3.2	70	3.733
3.9	60	3.900
3.8	60	3.800
4.1	55	3.758

Figura 8.8: Tempos - Operação Manual 08

RETIRAR GUIA DA CARCARÇA E COLAR DIFUSOR NA BOBINA (CONETO)		
Tempo	Ritimo	Campo14
4.4	60	4.400
4	65	4.333
4.5	60	4.500
4	65	4.333
4.1	65	4.442
4.4	60	4.400
5.2	50	4.333
4.7	55	4.308
4.3	60	4.300
4.9	55	4.492
4.1	65	4.442
5	55	4.583
4.7	55	4.308
4.4	60	4.400
3.8	70	4.433
4.2	65	4.550
4.5	60	4.500
4.8	55	4.400
5.1	55	4.675
4.5	60	4.500

Figura 8.9: Tempos - Operação Manual 09

MAGNETIZAR ALTO-FALANTE E POSICIONAR MALHA NOS TERMINAIS		
Tempo	Ritmo	Campo14
6.1	60	6.100
6.3	60	6.300
7.1	50	5.917
6.9	55	6.325
6.7	55	6.142
6.2	60	6.200
5.7	65	6.175
6	60	6.000
6.2	60	6.200
6.7	55	6.142
5.6	65	6.067
6.1	60	6.100
7	55	6.417
6.6	55	6.050
6.2	60	6.200
5.4	70	6.300
6.3	60	6.300
6.6	55	6.050
6.1	60	6.100
6.8	55	6.233

Figura 8.10: Tempos - Operação Manual 10

SOLDAR MALHA AOS TERMINAIS		
Tempo	Ritmo	Campo14
5.5	60	5.500
5.2	60	5.200
5.3	60	5.300
4.7	70	5.483
6	55	5.500
5.7	55	5.225
5.1	65	5.525
5.9	55	5.408
5.4	60	5.400
5	65	5.417
5.8	55	5.317
6.1	50	5.083
5.3	60	5.300
4.7	65	5.092
4.9	65	5.308
5.2	60	5.200
5.9	55	5.408
6.2	50	5.167
5.4	60	5.400
5.9	55	5.408

Figura 8.11: Tempos - Operação Manual 11

TESTAR ALTO-FALANTE (ANTES DAS 24 HORAS)		
Tempo	Ritmo	Campo14
5	60	5.000
4.7	60	4.700
5.4	55	4.950
5.3	55	4.858
4.8	60	4.800
4.7	60	4.700
5.1	55	4.675
4.7	60	4.700
4.5	65	4.875
4.9	60	4.900
4.7	60	4.700
5.2	55	4.767
4.8	60	4.800
4.3	65	4.658
5.4	55	4.950
5	60	5.000
4.9	60	4.900
5.2	55	4.767
4.6	60	4.600
5.3	55	4.858

Figura 8.12: Tempos - Operação Manual 12