

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**CURSO DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR  
SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE POR  
AGVs: O CASO DA EMBRACO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

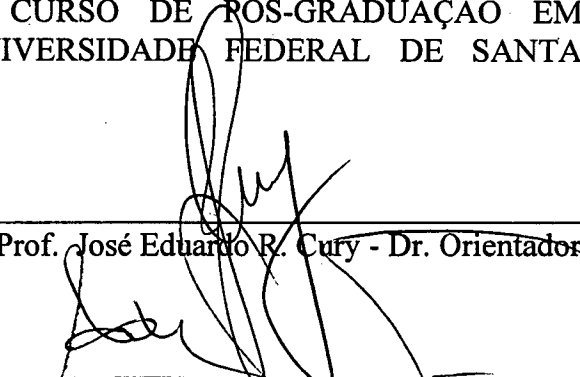
**MESTRANDO: CARLOS FERNANDO MARTINS  
ORIENTADOR: PROF. JOSÉ EDUARDO R. CURY**

**FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1997.**

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR  
SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE POR AGVs:  
O CASO DA EMBRACO**

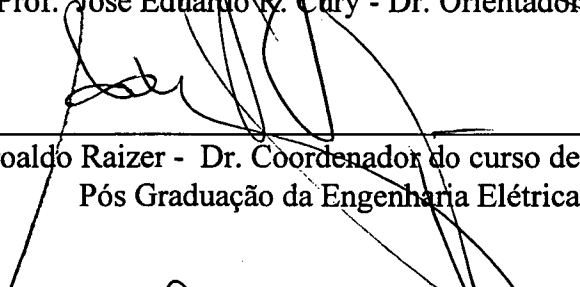
CARLOS FERNANDO MARTINS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ÁREA DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E INFORMÁTICA INDUSTRIAL, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.



---

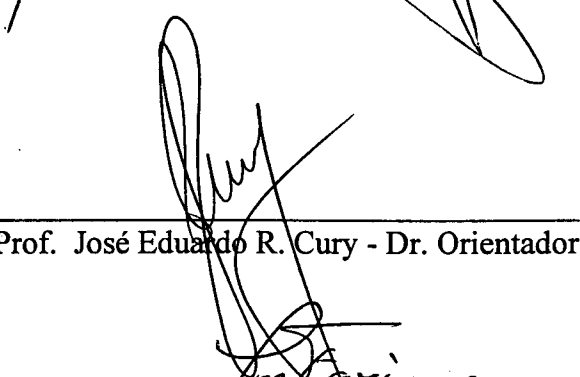
Prof. José Eduardo R. Cury - Dr. Orientador



---

Prof. Adroaldo Raizer - Dr. Coordenador do curso de Pós Graduação da Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:



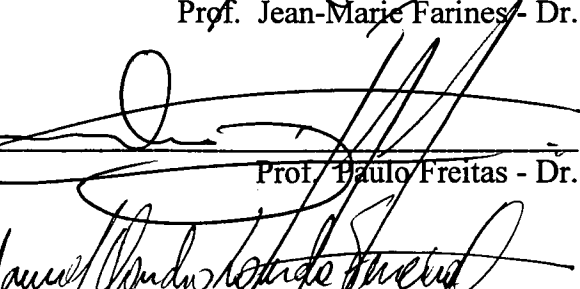
---

Prof. José Eduardo R. Cury - Dr. Orientador



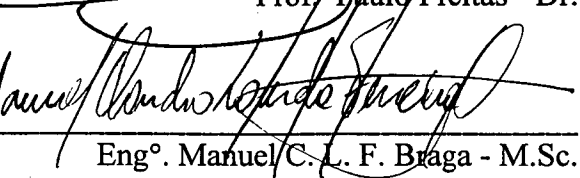
---

Prof. Jean-Marie Farines - Dr.



---

Prof. Paulo Freitas - Dr.



---

Eng.º Manuel C. L. F. Braga - M.Sc.

**DEDICO TODO ESTE TRABALHO À MINHA MÃE, AO MEU PAI,  
E A TODA MINHA FAMÍLIA E AMIGOS**

## VOCÊ NÃO PODE DESISTIR

“QUANDO TUDO DÁ ERRADO, O QUE ACONTECE ÀS VEZES,  
QUANDO A ESTRADA QUE VOCÊ ESTÁ TRILHANDO PARECE LONGA,  
QUANDO OS FUNDOS SÃO ESCASSOS E AS CONTAS SÃO ALTAS  
E VOCÊ QUER SORRIR, PORÉM PRECISA SUSPIRAR,  
QUANDO A PREOCUPAÇÃO O PRESSIONA UM POUCO,  
DESCANSE SE PRECISAR - PORÉM, NUNCA DESISTA.

A VIDA É ESTRANHA, COM SUAS IDAS E VINDAS,  
ISSO TODOS NÓS ACABAMOS APRENDENDO;  
MUITAS VEZES FRACASSAMOS  
QUANDO SE PODERIA TER GANHO, SE TIVESSE HAVIDO PERSISTÊNCIA;  
CONTINUE A SUA TAREFA, EMBORA O RITMO PAREÇA LENTO -  
VOCÊ PODE TER SUCESSO COM UM POUCO MAIS DE FÔLEGO.”

(AUTOR DESCONHECIDO).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao prof. Jean-Marie Farines e ao eng<sup>o</sup>. Manuel Braga pela colaboração fundamental a este trabalho. O início deste está diretamente ligado a estas duas pessoas que incansavelmente contribuíram até a etapa final com valiosos comentários, sugestões e críticas sobre todo o projeto desenvolvido.

Ao meu orientador, prof. José Cury, por toda a atenção e dedicação recebida, não somente no período de mestrado mas também no período de graduação como bolsista de iniciação científica onde também foi meu orientador. Tudo o que aprendi neste período, devo ao meu orientador.

Ao eng<sup>o</sup>. Márcio da EMBRACO pela interesse e colaboração fundamental a este projeto, elucidando dúvidas e acompanhando todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Paulo Freitas pelas valiosas contribuições.

Aos demais engenheiros, técnicos e estagiários que também participaram deste projeto, ajudando sobretudo no estudo do sistema de transporte da EMBRACO.

Ao pessoal da coordenadoria de pós graduação da engenharia elétrica pelos serviços prestados.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

Ao departamento de engenharia elétrica pela acolhida recebida.

À toda minha família e amigos que estiveram sempre presentes e muito contribuíram para a realização deste projeto.

A DEUS, início e fim de tudo.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	xii
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1. CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR SIMULAÇÃO</b> .....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Uma Introdução à Modelagem por Simulação.....	5
2.2.1 Definições básicas.....	5
2.2.2 Desenvolvimento da Simulação.....	9
2.3 Vantagens e Desvantagens da Simulação como Ferramenta de Análise ...	11
2.4 Etapas de um Projeto de Simulação.....	12
2.4.1 Definição do Problema e Objetivos.....	14
2.4.2 Definição do Modelo Conceitual.....	14
2.4.3 Coleta de Dados.....	16
2.4.4 Codificação e Verificação do Modelo.....	18
2.4.5 Validação do Modelo.....	19
2.4.6 Projeto Experimental.....	20
2.4.6.1 Sistemas terminais.....	21
2.4.6.2 Sistemas não Terminais.....	23
2.5 Tendências da Simulação na Manufatura.....	27
2.6 Conclusão.....	27

---

<b>3. CAPÍTULO 3: OS SISTEMAS DE TRANSPORTE NA MANUFATURA.....</b>	<b>28</b>
3.1 Introdução .....	28
3.2 Funções e Tipos de Equipamentos para Manuseio de Materiais .....	29
3.3 Características de um Sistema de Transporte.....	30
3.4 Um Sistema Especializado de Transporte - AGVs .....	32
3.4.1 Definição .....	32
3.4.2 História dos AGVs .....	33
3.4.3 O Sistema de AGVs .....	34
3.5 Conclusão.....	37
<b>4. CAPÍTULO 4: MODELAGEM DO SISTEMA DE AGVs DA EMBRACO.....</b>	<b>38</b>
4.1 Introdução .....	38
4.2 Descrição do Problema e Objetivos .....	38
4.2.1 Motivação.....	38
4.2.2 Síntese .....	39
4.2.3 O Sistema de AGVs da EMBRACO.....	39
4.2.4 Política de Escalonamento de Ordens de Transporte .....	48
4.2.4.1 Geração de Ordens de Transporte .....	48
4.2.4.2 Atendimento dos AGVs às Estações .....	53
4.2.5 Objetivos do Projeto.....	54
4.3 Definição do Modelo Conceitual e Coleta de Dados.....	56
4.3.1 Escopo .....	56
4.3.2 Como Modelar?.....	57
4.3.3 Coleta de dados .....	66
4.4 Codificação do Modelo de Simulação .....	74
4.4.1 Codificação do Modelo Usando o SIMAN .....	74
4.5 Desenvolvimento das Etapas.....	78

---

4.6 Conclusão.....	79
<b>5. CAPÍTULO 5: VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DOS AGVs.....</b>	<b>80</b>
5.1 Introdução .....	80
5.2 Verificação do Modelo.....	80
5.3 Validação do Modelo .....	82
5.4 Desenvolvimento das Etapas.....	89
5.5 Conclusão.....	89
<b>6. CAPÍTULO 6: EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>91</b>
6.1 Introdução .....	91
6.2 Dados de Entrada do Modelo de Simulação .....	91
6.3 Interpretação dos Resultados Usando SIMAN.....	94
6.4 Execução e Análise dos Resultados do Modelo de Simulação dos AGVs ..	96
6.4.1 Interpretando os Resultados da Simulação.....	100
6.4.2 Analisando os Resultados da Simulação .....	111
6.5 Desenvolvimento da Etapa.....	117
6.6 Conclusão.....	117
<b>7. CONCLUSÃO FINAL.....</b>	<b>118</b>
<b>8. PERSPECTIVAS .....</b>	<b>121</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>123</b>
<b>10. ANEXO 1 .....</b>	<b>126</b>



# LISTA DE FIGURAS

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Processo de Abstração na Modelagem.....	7
Figura 2.2 - Definição de Eventos e Atividades .....	8
Figura 2.3 - Desenvolvimento da Simulação .....	10
Figura 2.4 - Etapas de Desenvolvimento de um Modelo de Simulação .....	13
Figura 2.5 - Precisão do Modelo x Detalhes de Implementação .....	15
Figura 2.6 - Nível de Implementação x Tempo Para Construção do Modelo .....	16
Figura 2.7 - Composição das Entidades (Abstração).....	17
Figura 2.8 - Validação do Modelo de Simulação.....	19
Figura 2.9 - Média das Réplicas de um Modelo de Simulação.....	22
Figura 2.10 - Gráfico do Tempo Médio Gasto em um Sistema.....	24
Figura 2.11 - Suavização da Curva Tempo Médio no Sistema.....	24
Figura 2.12 - Correlograma das Observações Registradas .....	26
Figura 2.13 - Independência Entre os Grupos Formados.....	26
Figura 2.14 - Gráfico Função t x Graus de Liberdade .....	27

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Tipos de AGVs.....	32
Figura 3.2 - Princípios de Funcionamento dos AGVs .....	34
Figura 3.3 - Direcionamento dos AGVs .....	35

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Sistema em Análise .....	40
Figura 4.2 - Direcionamento dos AGVs da EMBRACO.....	41
Figura 4.3 - Comunicação dos AGVs via “Transceivers” .....	41
Figura 4.4 - Características de um AGV da EMBRACO .....	42
Figura 4.5 - “LayOut” do Sistema de AGVs .....	44
Figura 4.6 - Controle dos AGVs.....	45
Figura 4.7 - “LayOut” da EMBRACO Simplificado.....	45

Figura 4.8 - Estação de carga e Descarga .....	46
Figura 4.9 - Cesto para Peças.....	46
Figura 4.10 - Pilha Vertical de Cestos .....	47
Figura 4.11 - AGV Carregando Cestos.....	47
Figura 4.12 - Política de Escalonamento .....	49
Figura 4.13 - Execução de Ordens de Transporte.....	49
Figura 4.14 - Procura por um AGV no Chão de Fábrica.....	50
Figura 4.15 - Exemplo de um Processo de Busca por um AGV.....	51
Figura 4.16 - Pesquisa em Caminhos Paralelos.....	51
Figura 4.17 - Pesquisa de Caminhos no Setor de Soldagem.....	52
Figura 4.18 - Escopo do Modelo do AGVS.....	56
Figura 4.19 - Recursos Incluídos no Modelo.....	57
Figura 4.20 - Composição das Entidades no Modelo .....	58
Figura 4.21 - Simplificação das Distâncias Entre as Estações (Carga/Descarga).....	59
Figura 4.22 - Diagrama de Blocos do Processo de Transporte por AGVs .....	61
Figura 4.23 - Rede de Petri da Porta Automática I.....	63
Figura 4.24 - Rede de Petri da Porta Automática II.....	64
Figura 4.25 - Troca de Pista.....	65
Figura 4.26 - Rede de Petri dos Pontos de troca de Pista .....	65
Figura 4.27 - Taxa de Produção do Componente Tampa do Cilindro .....	68
Figura 4.28 - Taxa de Produção do Componente Rotor I.....	69
Figura 4.29 - Taxa de Produção do Componente Rotor II.....	69
Figura 4.30 - Taxa de Produção do Componente Bloco I.....	69
Figura 4.31 - Taxa de Produção do Componente Bloco II .....	70
Figura 4.32 - Taxa de Produção do Componente Pistão I .....	70
Figura 4.33 - Taxa de Produção do Componente Pistão II .....	70
Figura 4.34 - Taxa de Produção do Componente Eixo I.....	71
Figura 4.35 - Taxa de Produção do Componente Eixo II .....	71
Figura 4.36 - Taxa de Produção do Componente Placa Válvula .....	71
Figura 4.37 - Taxa de Produção do Componente Solda Tampa I.....	72
Figura 4.38 - Taxa de Produção do Componente Solda Corpo I.....	72
Figura 4.39 - Taxa de Produção do Componente Solda Tampa II.....	72
Figura 4.40 - Taxa de Produção do Componente Solda Corpo II.....	73
Figura 4.41 - Taxa de Produção do Componente Estator I.....	73
Figura 4.42 - Taxa de Produção do Componente Estator II.....	73
Figura 4.43 - Programa em SIMAN para Criação de Entidades.....	74
Figura 4.44 - Controle dos AGVs da EMBRACO .....	75
Figura 4.45 - Ocupação e Liberação de Zonas.....	75
Figura 4.46 - Programa em SIMAN do Controle da Posição dos AGVs.....	75
Figura 4.47 - Matriz de Distância mais Curta entre as Estações.....	77

Figura 4.48 - Matriz de Identificação do Caminho .....	77
Figura 4.49 - Novo Caminho Através da Porta Automática .....	77
Figura 4.50 - Otimização do Cruzamento .....	78

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Execução do Modelo Passo a Passo .....	81
Figura 5.2 - Tempo de Espera nas Estações para Transporte .....	84
Figura 5.3 - Variação Casual x Variação não Casual.....	86
Figura 5.4 - Limites Críticos de t.....	86
Figura 5.5 - Tamanho do Erro do Tipo II .....	87

## CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Menu I de Opções .....	92
Figura 6.2 - Menu II de Opções .....	92
Figura 6.3 - Menu III de Opções.....	93
Figura 6.4 - Menu IV de Opções.....	93
Figura 6.5 - Menu V de Opções.....	93
Figura 6.6 - Suavização do Gráfico - Tempo no Sistema .....	99
Figura 6.7 - Correlograma das Observações .....	101
Figura 6.8 - Intervalo de Confiança Gerado .....	102
Figura 6.9 - Resultados da Simulação.....	103
Figura 6.10 - Utilização dos AGVs 1 e 3.....	112
Figura 6.11 - Utilização dos AGVs 2 e 4.....	114
Figura 6.12 - Percentuais de Carga Máxima.....	114
Figura 6.13 - Percentuais - AGVs Parados Esperando Ordem .....	115
Figura 6.14 - Percentuais - AGVs em Movimento sem Carga .....	115

## ANEXO 1

Figura A.1 .....	126
------------------	-----

## LISTA DE SIGLAS

AGVS	Automated Guided Vehicle System	Sistema de Veículos Guiados Automaticamente
AGV	Automated Guided Vehicle	Veículo Guiado Automaticamente
CAD	Computer Aided Design	Projeto Auxiliado por Computador
CIM	Computer Integrated Manufacturing	Manufatura Integrada por Computador
CLP		Controlador Lógico Programável
EMBRACO		Empresa Brasileira de Compressores
FIFO	First in First out	Primeiro que entra Primeiro que sai
FMS	Flexible Manufacturing System	Sistema Flexível de Manufatura
LCMI		Laboratório de Controle e MicroInformática
MRP	Material Requeriments Planning	Planejamento dos Requisitos de Materiais
UFSC		Universidade Federal de Santa Catarina

## RESUMO

**E**ste trabalho tem como objetivo mostrar o desenvolvimento de um modelo de simulação de um sistema de transporte especializado (AGVS) da empresa EMBRACO. Este sistema de transporte está implementado na fábrica II da empresa. Os AGVs transportam peças de um sistema de fabricação (usinagem e soldagem) para linhas de montagem onde são montados os produtos finais (compressores herméticos). Todo o projeto foi dividido em várias etapas facilitando a construção do modelo: Definição do problema e Objetivos; Desenvolvimento do modelo conceitual e Coleta de dados; Codificação e Verificação; Validação do modelo; Projeto experimental; Execução e análise dos resultados e Apresentação dos resultados finais. Como resultado da execução de cada uma destas fases, obteve-se um modelo de simulação do sistema de AGVs implementado em uma linguagem específica SIMAN/CINEMA. A finalidade deste projeto (modelo de simulação) foi realizar uma avaliação de desempenho do sistema de transporte da EMBRACO através de vários índices de desempenho, além de verificar o comportamento do sistema em regime permanente sob determinada taxa de produção horária e propor alterações nas rotas dos AGVs fazendo-os percorrer distâncias mais curtas entre as estações de carga e descarga de peças. Todos os procedimentos para construir o modelo e para realizar um experimento de simulação estão descritos neste trabalho. Uma metodologia para avaliação de desempenho aplicada é minuciosamente detalhada, mostrando todos os passos necessários para se obter uma estimativa dos índices de interesse em intervalos de confiança. Por fim, devido a grande utilidade do modelo, são descritas algumas possíveis utilizações do modelo no futuro como ferramenta de apoio na tomada de decisão.

## ABSTRACT

This work aims at showing the development of a simulation model for a specialized transport system (AGVS) of EMBRACO. This transport system is working at the factory II of this company. The AGVs carry parts from the manufacturing area to assembly lines where the final products are assembled (hermetic compressors). The whole project was made in several steps, making the model's building easier: Problem definition and objectives; Conceptual model formulation and Input data preparation; Model translation and Verification; Model's validation; Final experiment design; Analysis and Interpretation; Implementation and Documentation. As a final result, a simulation model of the AGVs was implemented in a specific language (SIMAN/CINEMA). The aim of this simulation model was carrying out a performance evaluation of EMBRACO's transport system through several performance indexes, besides the verification of the system behavior in steady state for a specific timetable production rate. Changes in the AGVs routes were proposed allowing them to travel shorter distances between stations. All the procedures to build the model and carry out a simulation experiment are described in this work. The methodology for the performance evaluation is also described in detail, showing all the necessary steps in order to get a desired confidence interval for the interest variable.

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

---

**A**tualmente, com o grande desenvolvimento tecnológico provocado em grande parte pelo rápido desenvolvimento dos sistemas computacionais, tanto a nível de “software” quanto a nível de “hardware”, os sistemas de manufatura vêm se tornando cada vez mais complexos. Este aumento de complexidade está intrinsicamente ligado ao fato de que cada vez mais os computadores estão atuando em ambientes industriais, controlando todos os fluxos de produção e informação, tornando estes ambientes mais flexíveis às rápidas mudanças de mercado.

Obviamente, toda esta complexidade relacionada à automatização dos sistemas de produção envolvem um grande custo relacionado à compra de equipamentos, programas de computadores, treinamento de pessoal, etc. Para justificar estes altos investimentos, há a necessidade de se realizar um projeto que explicitamente detalhadamente as conquistas a serem alcançadas do ponto de vista da produtividade, flexibilidade e eficiência do sistema.

Assim, devido à complexidade e os custos envolvidos, os projetos de um sistema de manufatura devem ser apoiados na utilização de ferramentas que possibilitam estudá-lo antes que qualquer decisão seja efetivamente tomada. Os testes (experimentos) passam a ser realizados sobre a ferramenta e não mais sobre o sistema real, possibilitando adquirir um conhecimento detalhado a respeito do problema a ser resolvido e quais as possíveis soluções a serem consideradas de modo a garantir facilidade, segurança e baixos custos na execução destes projetos. O objetivo é realizar uma avaliação de possíveis estratégias de produção, alterações de “layout”, etc. antes que qualquer decisão seja implementada.

Resumindo, tendo em vista os perigos de se realizar testes com o próprio sistema real ou até mesmo a impossibilidade de realizá-los devido aos altos custos envolvidos, os testes passam a serem executados sobre um modelo do sistema. Um modelo é uma representação abstrata do sistema que se está estudando, é uma descrição lógica do mesmo permitindo uma compreensão de tudo o que se está analisando. Segundo [2], intuitivamente, modelo é um dispositivo que simplesmente duplica o comportamento do próprio sistema. Para ser mais preciso, precisamos descrever uma lógica que represente adequadamente o comportamento do sistema.

É através do modelo de um sistema que alternativas de produção podem ser testadas antes que qualquer sejam implementadas, possibilitando assim, estudar primeiramente as relações entre os componentes de produção e seus comportamentos ao longo do tempo de acordo com regras estabelecidas a serem analisadas.

Os métodos de análise podem ser divididos em duas classes maiores:

**(A) Métodos analíticos.**

**(B) Simulação.**

Nos métodos analíticos, expressões matemáticas (equações algébricas, diferenciais ou à diferença) são utilizadas para modelar e analisar um processo através de variáveis ou índices de desempenho de interesse [2]. A solução ou conjunto de soluções destas equações são estimativas dos parâmetros analisados.

Esta classe de métodos é bastante utilizada nos estágios iniciais de um projeto pelo fato de ser rápida, fornecendo um menor conjunto de soluções aproximadas dentro de um nível de confiança desejado, aumentando a capacidade de análise e compreensão dos primeiros resultados. No entanto, para uma análise mais detalhada e precisa de sistemas mais complexos, grandes quantidades de dados são necessárias, dificultando a modelagem por equações matemáticas devido ao grande número de variáveis envolvidas, tornando as soluções difíceis de serem encontradas. Além disso, se grandes simplificações forem realizadas com o objetivo de modelar o comportamento de um sistema por equações matemáticas, questões importantes a nível de detalhes podem ser ignoradas ou simplificadas e, com isso, o modelo perde em precisão e em fidelidade o poder de representação do sistema em estudo. Neste caso, as soluções destas equações simplificadas são estimativas não confiáveis dos parâmetros analisados.

Por outro lado, o método de simulação é utilizado principalmente para modelar sistemas complexos com grande nível de detalhes e fidelidade. Segundo [1], a simulação é uma técnica de resolução de problemas pela observação do comportamento, sobre o tempo, de um modelo dinâmico de um sistema, ou seja, o método de simulação é um processo através do qual o modelo de simulação é avaliado numericamente e os resultados obtidos são usados para estimar variáveis ou índices de desempenho de interesse. Neste sentido, o comportamento do sistema ao longo do tempo pode ser melhor entendido através de vários experimentos executados.

Apesar de preciso, o método de simulação é custoso do ponto de vista de desenvolvimento e resolução, pois há a necessidade de uma grande quantidade de dados para representar, em determinado nível de detalhe, o comportamento do sistema, além da necessidade de conhecimento de uma linguagem de simulação para o desenvolvimento do programa e de grande quantidade de tempo para execução das simulações.

Com a necessidade de se obter respostas mais confiáveis a respeito do funcionamento do sistema, atualmente a simulação é uma das ferramentas mais adequadas e mais utilizadas nas fases de projeto. A cada dia mais empresas descobrem as vantagens da simulação. Através deste processo, pode-se simular na tela do computador novos “layouts”, mudanças de processos e de plantas, armazéns, e mesmo detalhar o funcionamento de cada máquina, visualizando em poucos minutos o andamento, por



exemplo, de um mês de produção [33]. O objetivo final da simulação é construir uma realidade virtual para se obter uma economia real.

O objetivo deste trabalho é construir um modelo de simulação para avaliação de desempenho do sistema de transporte da empresa EMBRACO. O objetivo principal deste modelo é verificar o comportamento do sistema ao longo do tempo e analisar a capacidade de atendimento do sistema de transporte de material a determinado nível de produção.

Conforme será visto no capítulo 4, o sistema de transporte de material da EMBRACO é formado por quatro veículos guiados automaticamente (AGVs). Estes veículos transportam peças dos setores de fabricação para as linhas de montagem guiando-se através de fios sob o piso da fábrica por onde circula uma corrente que induz um campo magnético. Este campo induzido é captado por antenas colocadas sob os AGVs permitindo uma orientação dos veículos. Todos os veículos são controlados por um CLP que determina todas as atividades a serem executadas pelo sistema de transporte.

Devido à complexidade existente e à necessidade de se obter um modelo fidedigno, um modelo de simulação foi selecionado como mais apropriado do que um modelo analítico, permitindo descrever o sistema com um maior nível de detalhe.

Dentro deste contexto, este trabalho tem o propósito de cumprir as seguintes metas principais:

1. Construir um modelo de simulação para avaliação de desempenho do sistema de transporte (AGVS) da EMBRACO.

2. Através do modelo de simulação, verificar a capacidade de atendimento dos AGVs. Os AGVs conseguem atender a uma determinada demanda de produção? Esta pergunta será respondida através de um conjunto de resultados de saída (estimação de parâmetros) no fim da execução do modelo.

3. Entender melhor o comportamento do sistema em regime permanente de produção. Como funcionam as políticas de escalonamento (atendimento dos AGVs) às estações.

4. Verificar a possibilidade dos AGVs percorrerem caminhos mais curtos, diminuindo o tempo de viagem entre duas estações.

Para alcançar estes objetivos, este trabalho está organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 2 (**Avaliação de Desempenho por Simulação**) desenvolve um estudo sobre a simulação de sistemas, definindo os principais conceitos utilizados no mundo da

simulação, abordando as principais aplicações, características, vantagens e desvantagens de se utilizar a simulação como ferramenta de projeto.

O capítulo 3 (**Os Sistemas de Transporte na Manufatura**) descreve a importância de um sistema de transporte na produção, qualificando-o como um item fundamental para toda a organização de um ambiente fabril. Neste capítulo há também uma descrição completa do sistema de transporte por AGVs mostrando os princípios de funcionamento e sua importância para sistemas flexíveis.

O capítulo 4 (**Modelagem do Sistema de AGVs da EMBRACO**) descreve todo o processo de construção do modelo de simulação do sistema de transporte da empresa, detalhando o princípio de funcionamento dos AGVs, a construção do modelo conceitual e a codificação em uma linguagem de simulação.

O capítulo 5 (**Verificação e Validação do Modelo de Simulação dos AGVs**) discute a verificação (correção dos erros lógicos) e validação (comparação com o sistema real) do modelo de simulação dos AGVs e as principais dificuldades encontradas para realizar estas etapas.

O capítulo 6 (**Experimento e Análise dos Resultados da Simulação**) descreve todo o procedimento para execução do modelo de simulação, tratamento estatístico e análise final dos resultados. É neste capítulo que são fornecidas as respostas para as questões levantadas inicialmente (objetivos do projeto).

Por fim, uma conclusão final de todo o trabalho é apresentada, em conjunto com as perspectivas de trabalhos futuros envolvendo a utilização do modelo para responder novas questões levantadas a respeito do funcionamento do sistema.

No anexo deste trabalho, estão colocadas as principais funções para a construção de um modelo de simulação através de uma linguagem específica de simulação (SIMAN).

# CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR SIMULAÇÃO

---

---

## 2.1 INTRODUÇÃO

A modelagem por simulação é provavelmente a técnica de análise mais utilizada nos projetos de manufatura. É uma ferramenta muito flexível que permite estudar e entender os componentes do sistema sendo modelado e suas relações lógicas, tornando-se assim, indispensável para a resolução de problemas nas fases de projeto e operação do mesmo.

Este capítulo tem o objetivo de familiarizar o leitor com os principais termos usados na modelagem de sistemas e descrever a importância da simulação nas etapas de projeto.

Na seção 2.2, uma introdução à simulação é apresentada através de conceitos e aplicações em diferentes ambientes. A seção 2.3 descreve as vantagens e desvantagens da simulação quando utilizada na fase de projeto. A seção 2.4 apresenta as etapas necessárias para realizar um estudo de simulação enfocando um conceito mais geral do que simplesmente construir um modelo. É nesta seção que saberemos porque muitos modelos apresentam sucesso ou fracassam nos projetos de sistemas. Por fim, a seção 2.5 apresenta as direções futuras do uso da simulação nos ambientes de manufatura.

## 2.2 UMA INTRODUÇÃO À MODELAGEM POR SIMULAÇÃO

### 2.2.1 Definições Básicas.

A simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponíveis para projetistas ou operadores de sistemas ou processos complexos [1].

Simular, segundo o dicionário da língua portuguesa Aurélio, é, “fingir, representar com semelhança, aparentar, disfarçar, imitar, dissimular”. A simulação pode ser definida como um processo de modelagem de um sistema real e a condução de experimentos com este modelo com o propósito de entender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias

estratégias para operação do sistema [1]. De acordo com esta literatura, pode-se pensar na modelagem por simulação como uma metodologia experimental e aplicada para realizar:

- A descrição do comportamento do sistema;
- A construção de teorias ou hipóteses de acordo com o comportamento observado;
- A utilização do modelo para prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por mudanças no sistema ou em seus métodos de operação.

Em [2], simular é fingir para obter a essência de algo, sem a realidade; é a construção de um modelo abstrato representando algum sistema real. Em [3] podemos encontrar a definição de simulação como sendo um método analítico computadorizado onde o usuário especifica valores para os parâmetros do sistema sendo modelado. A simulação fornece valores numéricos de medidas de desempenho.

Por todo este texto, entenderemos a simulação como uma técnica de modelagem e avaliação de desempenho de sistemas cuja abordagem passa pela definição do problema e então, a construção de um modelo com o propósito de analisar o comportamento do sistema ao longo do tempo, através de índices ou medidas de desempenho.

Para facilitar o entendimento de todo o texto, um conjunto de termos muito usados na simulação são apresentados [1], [2], [10]:

**Modelo:** É uma representação abstrata com o objetivo de descrever o comportamento de um sistema, explorar um sistema hipotético ou projetar um melhor desempenho do sistema em estudo.

A incorporação da abstração dentro do estudo da modelagem é de fundamental importância, especialmente quando o interesse é estudar um sistema complexo. A abstração de um processo envolverá a redução do modelo construído facilitando a análise e entendimento do mesmo. Além disso, um modelo abstrato geralmente requer menos recurso computacional do que um modelo base (sem abstrações), facilitando sua execução. Ver figura 2.1.

Se em grande parte, as abstrações de um modelo de simulação são executadas através das simplificações e agregações dos componentes dentro do modelo, o projetista deve sempre manter o compromisso entre a fidelidade e a simplicidade do modelo construído. O desafio é encontrar um modelo que seja tanto fidedigno quanto relativamente tratável. A escolha do nível de abstração depende dos objetivos e requisitos de modelagem a serem alcançados. Os processos de abstrações podem ser vistos com detalhes em [4].

**Entidades:** São os componentes ou objetos temporários de um sistema e que requerem uma representação explícita dentro do modelo. Por exemplo, os clientes de um banco, as peças de um sistema de manufatura, etc.

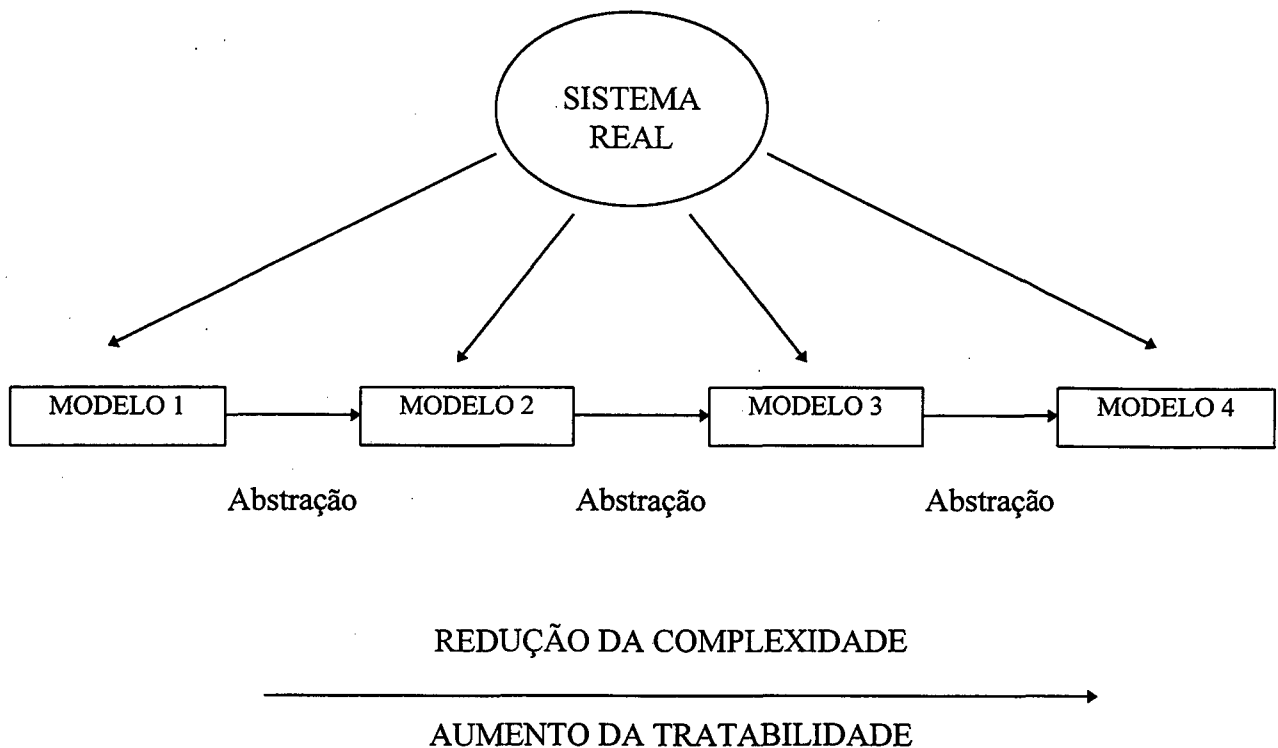


Figura 2.1 - Processo de Abstração na Modelagem

**Atributos:** São as propriedades ou características de uma dada entidade ou grupo de entidades individualizando-as dentro do modelo. Por exemplo, as peças produzidas em um sistema podem ser do tipo 1 ou do tipo 2. Cada peça neste caso, será caracterizada pelo seu número indicando a que grupo de peças ela pertence. Este procedimento de individualização das entidades ou grupo de entidades é de fundamental importância pois permite também a individualização do tipo de processo executado para cada grupo de entidade. No mesmo exemplo acima, peças do tipo 1 podem ser processadas durante um tempo de 10 minutos e as peças do tipo 2 durante um tempo de 15 minutos.

**Recursos:** São os componentes ou objetos permanentes de um sistema. Por exemplo, as máquinas, os sistemas de transporte, os operadores, etc.

**Evento:** É uma ocorrência instantânea que altera o estado de um sistema. Por exemplo, a chegada de peças a um sistema de produção, a finalização de um processo, etc.

**Atividade:** É uma duração de tempo especificado onde as entidades realizam alguma tarefa ou algumas tarefas são realizadas sobre as entidades [2]. Por exemplo, os tempos de processamento de uma máquina, os tempos de transporte de peças, etc. Ver figura 2.2.

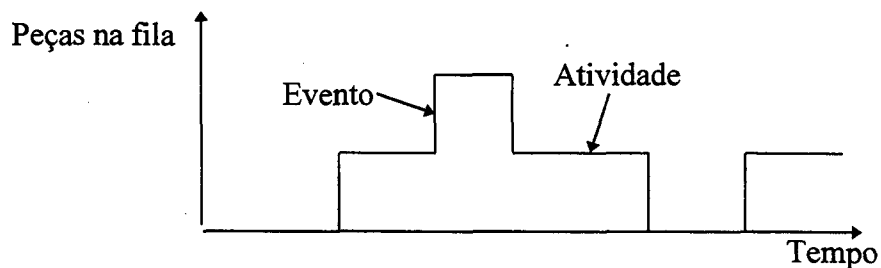


Figura 2.2 - Definição de Eventos e Atividades

**Fila:** É uma coleção de entidades ordenadas com alguma forma lógica. Por exemplo, os clientes em uma fila de espera são ordenados por ordem de chegada, as peças de um sistema de produção podem ser ordenadas por prioridades, etc.

**Estado do Sistema:** É uma coleção de variáveis que contém todas as informações necessárias para descrever o sistema em qualquer tempo. Por exemplo, as variáveis mostrando o número de peças em estoque, as máquinas em manutenção, etc.

Com estas definições, é possível definir sistema como sendo um conjunto de entidades que interagem entre si e realizam uma ou mais funções, e redefinir modelo como sendo uma representação abstrata de um sistema, contendo relações lógicas e/ou matemáticas que descrevem o comportamento do sistema em termos do seu estado, entidades, atributos, recursos, filas, eventos, atividades, etc. [1].

Outros termos bastante utilizados são referentes à classificação dos sistemas. Há três categorias:

**Sistemas Discretos:** São aqueles em que as variáveis de estados discretos mudam apenas em um conjunto de pontos discretos (específicos) no tempo. Por exemplo, o início de atendimento de um cliente começa em um tempo específico.

**Sistemas Contínuos:** São aqueles em que as variáveis de estados variam continuamente com o tempo. Por exemplo, a mudança de temperatura de um forno.

**Sistemas Híbridos:** São sistemas que envolvem tanto variáveis discretas como variáveis contínuas no tempo. Por exemplo, em um sistema de fundição, a temperatura do forno é contínua e as finalizações (acabamento das peças) ocorrem em tempos discretos, e mudam o estado discreto do sistema.

Como os sistemas, os modelos também podem ser classificados em:

**Modelos Estáticos e Dinâmicos:** Um modelo de simulação estático, às vezes chamado de simulação de Monte Carlo, representa o sistema em um ponto particular no

tempo. Um exemplo, é o caso de um modelo que calcula o lucro de uma empresa no fim de cada ano.

Um modelo de simulação dinâmico representa o comportamento do sistema ao longo do tempo. A simulação de um ambiente fabril mostrando a evolução no tempo é um exemplo de modelo dinâmico.

**Modelos determinísticos e Estocásticos:** Um modelo determinístico é um modelo que não apresenta variáveis aleatórias. O modelo apresenta um conjunto de entradas conhecidas que resultarão em um único conjunto de saídas.

Se na estrutura do modelo houver uma ou mais variáveis aleatórias, o modelo é dito estocástico. Por exemplo, não se pode definir com certeza quando que um cliente chegará em um banco ou o tempo necessário para atender este cliente. Nestes modelos, as medidas de saída são tratadas como uma estimativa estatística do verdadeiro valor do parâmetro do sistema real.

**Modelos Discretos, Contínuos e Híbridos** são definidos de maneira análoga aos tipos de sistemas. Entretanto, nem sempre um modelo discreto é utilizado para modelar um sistema discreto e nem sempre um modelo contínuo é utilizado para modelar um sistema contínuo. No caso da construção de um modelo do sistema populacional, por exemplo, pode-se considerar que os nascimentos e mortes sejam variáveis aleatórias contínuas e descrever todo o comportamento do sistema por um conjunto de equações diferenciais facilitando a construção e análise do modelo [1].

### **2.2.2 Desenvolvimento da Simulação.**

A literatura em simulação tem sido abundante com desenvolvimentos teóricos, desenvolvimento de linguagens e aplicações práticas [3]. Ver figura 2.3.

A utilização da simulação como ferramenta de projeto e análise tem sido realizada em diversas áreas devido à sua versatilidade e facilidade de uso. Entre as principais áreas de aplicação temos: Os ambientes de manufatura, com testes de “layouts”, sistemas de transportes, linhas de montagem, sistemas de controle em tempo real, planejamento da capacidade, entre outros.

Como exemplos da aplicação da simulação em sistemas, em [5] pode-se ver o uso da simulação para o estudo de um processo de revestimentos cerâmicos, estimando medidas de desempenho, verificando gargalos de produção, determinando a produtividade sob certas configurações do sistema e política de produção, etc. Em [6], há uma descrição da aplicação da simulação em uma fábrica de moldes. Neste caso, a simulação foi utilizada para estudar o sistema sob certas abordagens de operação, avaliando outras estratégias, configurações, impactos das alterações propostas sobre o desempenho do sistema, etc.

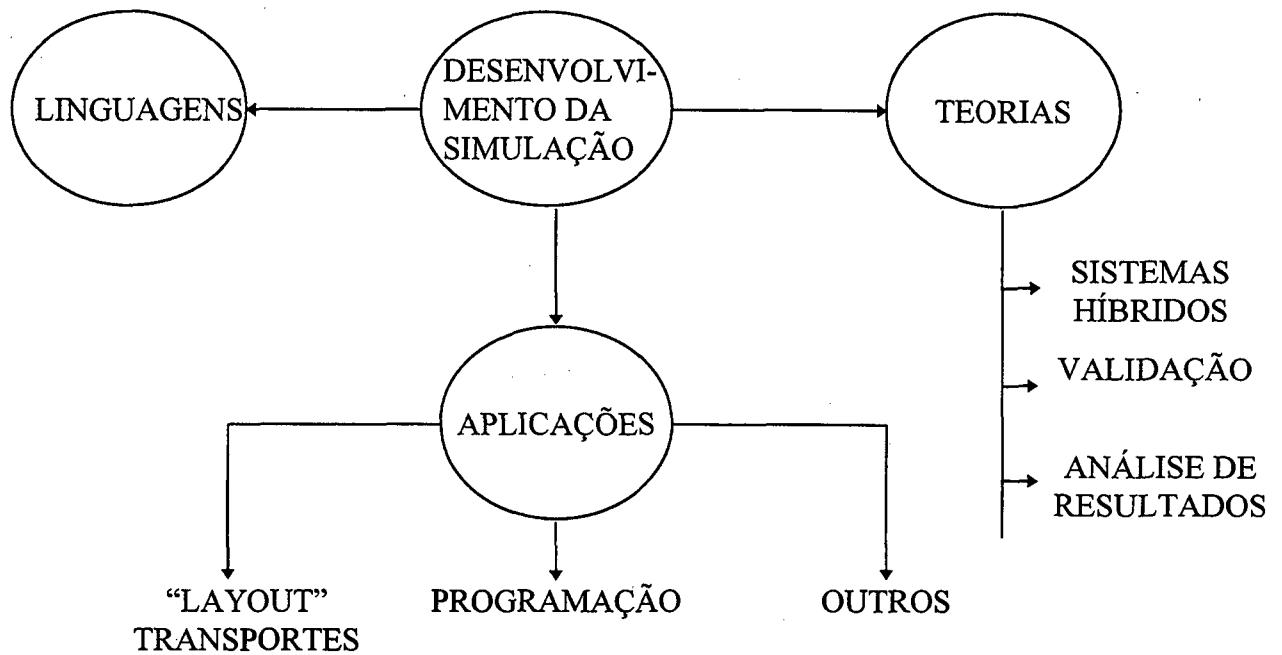


Figura 2.3 - Desenvolvimento da Simulação

Além dos sistemas de produção, o uso da simulação também é crescente em outras áreas: Na medicina, por exemplo, na universidade de Illinois, Estados Unidos, um simulador desenvolvido por pesquisadores está auxiliando na redução dos custos nos testes de produtos químicos frequentemente usados no desenvolvimento de drogas [7]. Na eletrônica, novos circuitos são simulados e alterações testadas, eliminando a necessidade de executar os experimentos sobre os circuitos reais. Na área ambiental, impactos sobre o ambiente são previstos sob determinadas condições, por exemplo, nível de poluição, congestionamentos, desmatamentos, etc. Na área militar, a simulação permite determinar estratégias militares, treinamento de pilotos de avião, etc.

Somando-se ao uso tradicional, a simulação está sendo expandida para novas áreas de interesse. Entre estas novas áreas de aplicação está a área de operação de sistemas. Como a complexidade e a flexibilidade dos sistemas automatizados estão crescendo, há necessidade de que a simulação ajude as pessoas nas suas decisões do dia a dia. Para assistir estas decisões, modelos de simulação estão sendo integrados com o sistema real. Entre as vantagens desta integração estão:

- Avaliação dos sistemas de controle em tempo real;
- Acompanhamento de todo o processo através de um monitor de um computador (animação de tempo real);
- Programação, planejamento da produção em tempo real.

Após o modelo de simulação ter sido usado para estimar medidas de desempenho do sistema, o projeto pode ser pensado como finalizado (fase de projeto). Na verdade, o modelo pode ser integrado a sistemas de controle fornecendo mecanismos de comparação



entre o desempenho do sistema real e o modelo, facilitando uma avaliação por parte dos engenheiros a respeito do funcionamento do sistema real.

Outra aplicação do modelo de simulação após a fase de projeto e análise está no monitoramento de todo o sistema. Atualmente, os sistemas de manufatura ou são complexos ou grande demais dificultando ou até mesmo impossibilitando uma análise mais detalhada a respeito do funcionamento do sistema em tempo real.

Um outro recurso geralmente disponível na construção de modelos de simulação é a animação gráfica fornecendo um modo excelente de visualizar as atividades dinâmicas sobre o chão de fábrica. Por exemplo, em um sistema de transporte por AGVs, os veículos se movem de estação para estação transportando peças, formando um sistema altamente complexo. A simulação em tempo real permite monitorar o estado do sistema e o desempenho de toda a fábrica, possibilitando verificar a posição de cada veículo, a estação anterior, a próxima estação, o estado do AGV, em qualquer orientação e escala. A animação também é bastante útil para verificar e validar um modelo.

A expansão da simulação na área de implementação e operação de sistemas industriais vem aumentando, apresentando uma melhoria na programação, no controle de estoques, verificação de capacidades e produtividade de sistemas causando uma rápida proliferação e demanda desta tecnologia [7].

Enfim, o crescente uso da simulação na indústria, comércio, educação e ciência não pode ser negado. Os exemplos mostrados denotam a versatilidade da simulação para a solução de uma grande variedade de problemas, desde os mais simples até aos mais complexos.

### **2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE**

Atualmente, os engenheiros envolvidos com projeto, análise e operação dos sistemas de manufatura estão aumentando o uso da simulação por computador. Várias empresas já utilizam a simulação como ferramenta de projeto antes que equipamentos de produção sejam comprados, políticas de produção sejam alteradas, etc. A razão da utilização da simulação nos projetos de manufatura em geral, deve-se a que a simulação fornece estimativas estatísticas que medem o desempenho dos sistemas e fornece uma possibilidade de testes para vários cenários de produção [8]. Assim sendo, respostas não obtidas com outras abordagens podem ser analisadas através desta técnica.

Entre as grandes vantagens de se utilizar a simulação como técnica de projeto temos [1]:

(a) Novas políticas, procedimentos de operação, fluxos de informações podem ser testados;

(b) Novos “layouts”, programas computacionais, sistemas de transporte, etc. podem ser testados antes que sejam comprados e implementados;

(c) Hipóteses sobre como e porque certos fenômenos ocorrem podem ser testados;

(d) O tempo de execução pode ser controlado, possibilitando uma análise mais detalhada de determinados fenômenos;

(e) Gargalos de produção podem ser identificados;

(f) A simulação pode fornecer um entendimento de como o sistema realmente funciona, etc.

Outras vantagens são descritas em [6] abordando a simulação como ferramenta fundamental para o CIM.

Apesar do grande número de vantagens obtidas quando se escolhe a simulação como técnica de projeto, há a necessidade de treinamento especializado acarretando em elevados custos, além de muitas vezes a simulação consumir um grande tempo na elaboração e execução do modelo. Um estudo para reduzir os tempos de simulação a eventos discretos, mantendo a mesma confiabilidade de análise pode ser visto em [9].

Com todas estas características citadas, a simulação na indústria vem sendo aplicada em três grandes áreas [1]:

- Na área de projeto industrial, envolvendo-se na determinação do que o sistema deveria ser, como deveria funcionar;
- Na área de planejamento, com decisões de como o sistema deveria ser usado;
- E na área de operação relatando o uso atual do sistema.

Assim, avaliações, desenvolvimento e seleção de uma alternativa de produção para o sistema de manufatura pode ser facilitada enormemente para uma futura tomada de decisão. Por exemplo, em um projeto de sistemas de transporte, alternativas como transporte por esteiras, sistemas especializados como os AGVs entre outros podem ser avaliados e uma alternativa mais eficiente pode ser selecionada após os experimentos executados sobre o modelo de simulação.

## 2.4 ETAPAS DE UM PROJETO DE SIMULAÇÃO

Um estudo de simulação envolve mais do que simplesmente escrever e executar um programa computacional. A figura 2.4 mostra os passos para um estudo completo de simulação [10].

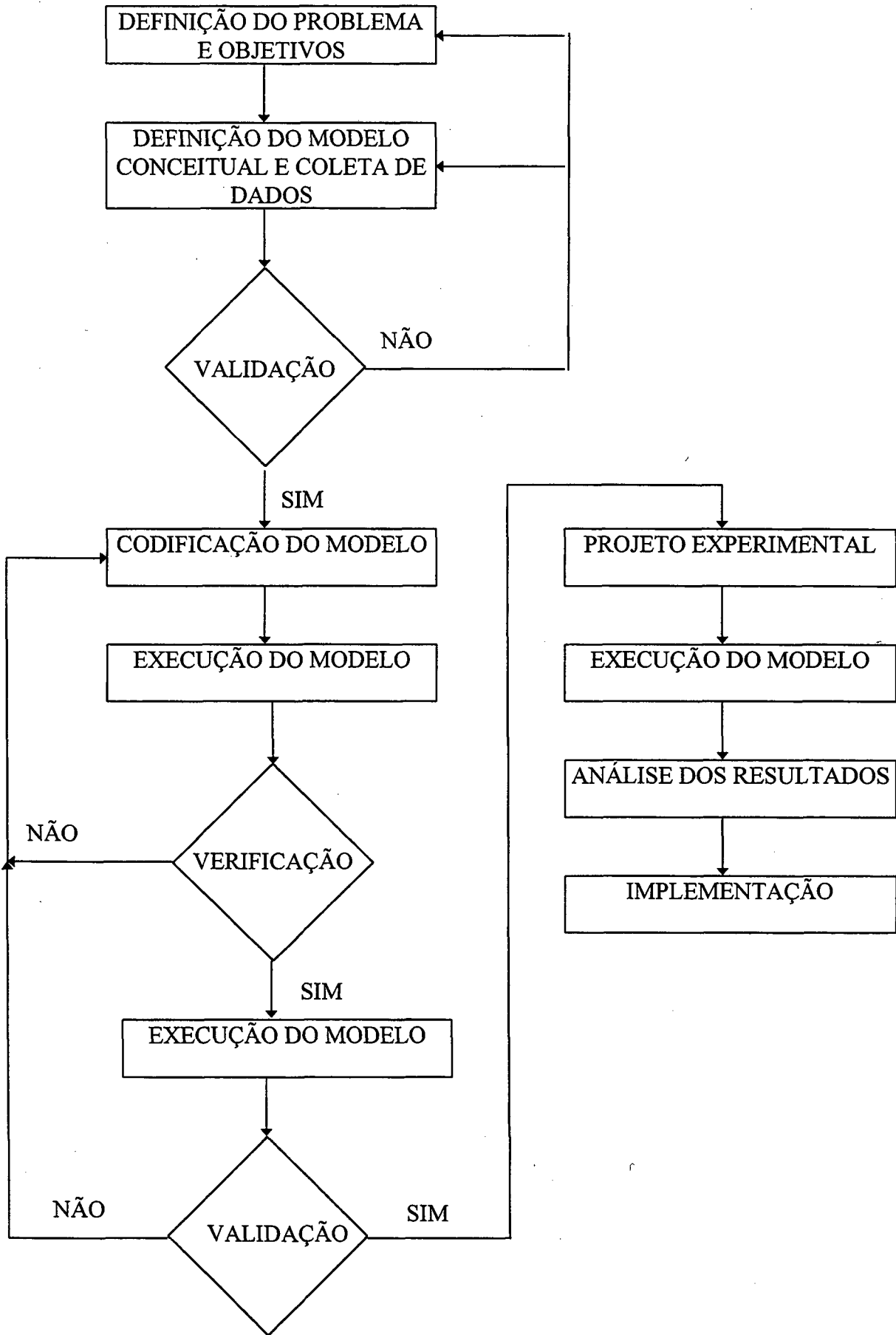


Figura 2.4 - Etapas de Desenvolvimento de um Modelo de Simulação

### 2.4.1 Definição do Problema e Objetivos.

A primeira etapa de qualquer estudo sempre deveria ser iniciada pela definição completa e objetiva do problema a ser resolvido. Uma boa solução para o problema só pode ser conseguida se o mesmo for completamente entendido. É importante definir o sistema e seus limites de forma clara, de maneira a não deixar dúvidas para a fase seguinte.

É importante também que nesta fase os objetivos do projeto sejam conhecidos de maneira precisa. Os objetivos indicam as questões a serem respondidas pelo modelo. Objetivos vagos podem resultar em poucas esperanças de sucesso no projeto final. Por exemplo, os objetivos de um estudo podem ser a avaliação de desempenho de AGVs em uma fábrica. Este é um objetivo específico. Entretanto, se os componentes do sistema de AGVs que são críticos para sua operação eficiente não são conhecidos, por exemplo, o modo de operação da política de escalonamento, os objetivos se tornam tão vagos quanto a própria definição do problema a ser solucionado.

Definido o problema e os objetivos, é útil saber se a simulação é uma ferramenta apropriada para o desenvolvimento do modelo do sistema, baseado na complexidade do sistema em estudo e na quantidade de detalhes requerida para representá-lo adequadamente.

Assumindo que a simulação seja utilizada para estudar o sistema, todo o planejamento deve incluir o número de pessoas envolvidas, o custo do modelo e o tempo requisitado para realizar o projeto.

### 2.4.2 Definição do Modelo Conceitual.

Nesta etapa há três preocupações básicas:

- (a) O que modelar?
- (b) Como modelar?
- (c) Como coletar os dados do sistema?

Nos projetos de simulação, há uma tendência de querer modelar tudo, sem pensar no que realmente é necessário. Para que se tenha sucesso com um projeto é necessário desenvolver um modelo conceitual correto. Este modelo deverá enfocar duas questões fundamentais:

**O escopo:** O que deveria ser incluído no modelo para se alcançar os objetivos do projeto. Por exemplo, uma máquina, um grupo de máquinas formando uma célula de manufatura, várias células de um ambiente fabril, etc.

**O nível:** A quantidade de detalhes necessária para a construção do modelo.

Para cada elemento dentro do escopo deveria ser questionado, qual o nível de detalhe necessário a ser modelado? Por exemplo, para a modelagem de uma máquina, há necessidade de se modelar as quebras?

Com estas duas questões bem definidas, o projetista deve adotar a seguinte regra básica para o nível de detalhes a ser considerado: Modelar a mínima quantidade de detalhes requerida para alcançar os objetivos do projeto [11]. Ver figura 2.5.

A figura 2.5 representa a precisão esperada de um modelo de simulação em relação a seu escopo e nível. A precisão de um modelo mede o grau de fidelidade do mesmo em relação ao sistema real. Inicialmente, aumentando o escopo e o nível se obtém significativos ganhos em precisão. Entretanto, após um certo nível, os ganhos não são mais significativos, diminuindo inclusive quando mais detalhes são acrescentados ao modelo. A questão é que, quando detalhes excessivos são considerados, é improvável que bons resultados estejam disponíveis para atender os parâmetros do modelo e a precisão do mesmo pode ser reduzida.

A figura 2.6 mostra o tempo requerido para construção de um modelo de simulação. A medida que a complexidade do modelo cresce, uma quantidade adicional de tempo é requerida para implementar e testar estes detalhes.

Por outro lado, se o modelo é simples demais, os resultados obtidos podem ser imprecisos e não representar a realidade. Assim, a definição do escopo e do nível do modelo são fundamentais para um bom projeto. A determinação correta do escopo e do nível deve ser baseada em alguns requisitos [11], entre eles:

- Os objetivos do projeto;
- Velocidade de execução;
- Disponibilidade de dados, etc.

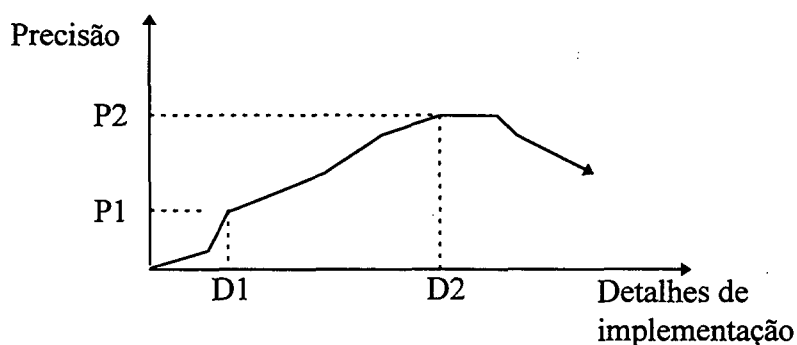


Figura 2.5 - Precisão do Modelo x Detalhes de Implementação

Quanto mais detalhes são considerados no modelo, menor é a velocidade de execução. O escopo e o nível deveriam ser tais que permitissem executar o modelo com uma velocidade adequada.

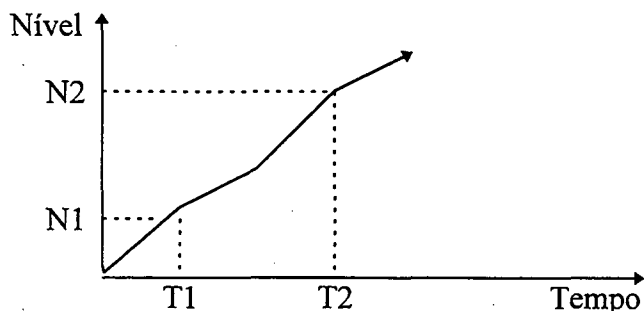


Figura 2.6 - Nível de Implementação x Tempo Para a Construção do Modelo

Então, uma questão importante a saber é: Qual é o escopo e o nível ótimo a ser considerado em um modelo de simulação? Para responder esta questão, devemos nos basear no princípio fundamental na elaboração de um projeto de simulação: Construir inicialmente um modelo apenas com o escopo e o nível mínimos e verificar se os objetivos foram alcançados. Se os resultados da simulação são imprecisos, o mecanismo da inclusão sucessiva de detalhes pode ser estabelecido [11]. Este mecanismo começa com um modelo básico (escopo e nível mínimos) e que, gradualmente, aumenta com a inclusão de detalhes no mesmo. Em cada estágio, pode-se verificar o impacto dos acréscimos destes detalhes sobre o modelo e, uma vez determinado que o acréscimo de detalhes na sua estrutura provoca poucos impactos na precisão, pode-se parar.

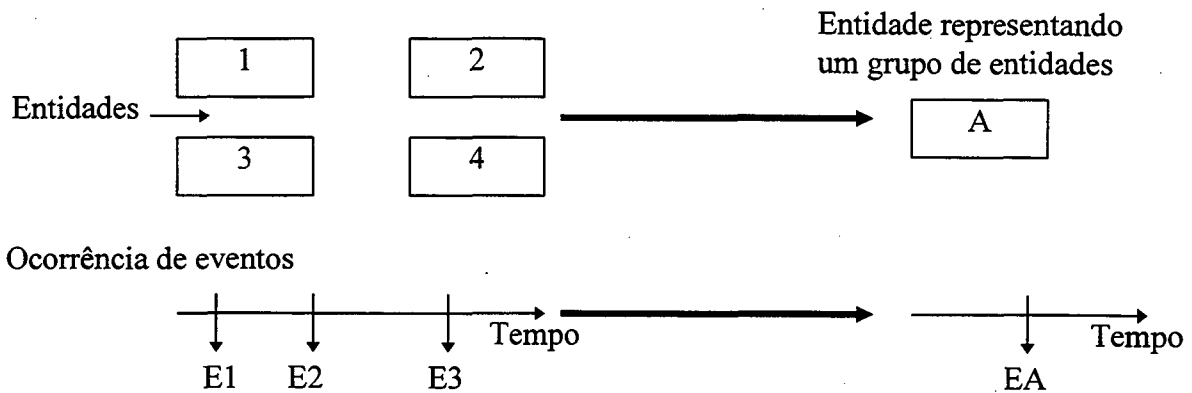
Outro fator importante que pode simplificar o modelo é a redução do número de eventos sobre o modelo em questão, melhorando a velocidade de execução da simulação, além de possibilitar uma menor utilização da memória computacional. Esta redução de eventos pode ser conseguida através da associação de elementos dentro do modelo, ou seja, um elemento pode representar um grupo de itens. Os eventos para cada item seriam combinados para formar apenas um único evento para o elemento que representa o grupo.

Esta prática de associação de elementos é muito comum para sistemas complexos. Por exemplo, em [5], no modelo de simulação para processos de revestimentos cerâmicos, uma entidade no modelo representa 1 metro quadrado de piso, sendo que cada metro quadrado possui de 4 a 5 pisos.

Obviamente, as características individuais são perdidas e há uma perda de precisão dos resultados. Entretanto, na maioria das situações, estas perdas são desconsideradas quando comparada com as vantagens das simplificações (abstrações). Ver figura 2.7.

### 2.4.3 Coleta de Dados.

Uma outra questão importante nesta etapa é a coleta de dados do sistema. Estes dados possuem um papel crucial para a validação do modelo.



E1 - Evento 1

E2 - Evento 2

E3 - Evento 3

EA - Evento da entidade A (representa os três eventos E1, E2 e E3).

Figura 2.7 - Composição de Entidades (Abstração)

Cada fonte de aleatoriedade do modelo deve ser representada por uma função de distribuição de probabilidade apropriada, sem a qual, uma possível validação do modelo será certamente dificultada pelos parâmetros do modelo.

Entre as fontes de aleatoriedade mais comuns nos modelos de simulação dos sistemas de manufatura estão [12]:

- Tempos entre chegada de peças;
- Tempos de processamento e/ou montagem de peças;
- Tempos de falhas de equipamentos;
- Tempos entre reparos de máquinas;
- Tempos para ajustes das máquinas, etc.

Para cada fonte, uma distribuição de probabilidade específica pode ser requisitada e cuidados especiais devem ser mantidos para não cair nas famosas armadilhas quando se está selecionando a função de distribuição.

Entre as armadilhas na seleção de uma função de distribuição está a substituição da função pelo seu parâmetro [12], seja o parâmetro uma média, o valor mais provável, etc., da distribuição em questão. Erros graves podem ser cometidos com esta substituição. Uma outra armadilha é utilizar a distribuição estatística errada. Para evitar este tipo de erro, testes estatísticos como os testes “Chi-Quadrado” e “Kolmogorov-Smirnov” são utilizados largamente como forma de medir a discrepância entre os dados observados e os dados coletados [1],[15], [30]. Porém, estes testes podem apenas ser executados quando os dados são conhecidos. Há situações em que não é possível coletar dados, conseqüentemente, ferramentas estatísticas usuais não podem ser aplicadas para o problema de seleção de uma

função de distribuição. Por exemplo, se o sistema de manufatura sendo modelado ainda não existe, a coleta de dados torna-se impossível. Para estes casos, pode-se utilizar distribuições específicas para estimar a verdadeira função de distribuição. Entre estas funções específicas estão: a função de distribuição Triangular, a função Beta e até mesmo a função Uniforme. Os parâmetros destas funções podem ser estimados por especialistas no processo real em estudo.

Mesmo com a possibilidade de estimar as funções de distribuição, aproximações “rudes” podem ser obtidas e assim, cairmos na armadilha da distribuição errada.

O que se pode constatar é que a coleta de dados pode consumir um grande tempo no projeto. É obvio também que o tempo e o esforço gastos com a preparação dos dados reflete a importância dos mesmos no estudo da simulação como forma de obter um modelo fidedigno.

#### **2.4.4 Codificação e Verificação do Modelo.**

A etapa de codificação é a transcrição do modelo conceitual desenvolvido na etapa anterior para um código computacional, seja em uma linguagem geral (Pascal, C, etc.) ou em uma linguagem específica de simulação (Siman, Simula, etc.). Em [1] pode-se constatar as vantagens de se utilizar uma linguagem específica de simulação, entre elas: A tarefa de programação é reduzida; há uma maior flexibilidade para a construção do modelo; menores erros de programação, etc. É importante também determinar qual “software” ou linguagem será utilizada, para que os objetivos do projeto possam ser alcançados.

Em conjunto com a codificação, a verificação do modelo pode ser realizada à medida que a implementação progride. Este procedimento facilita o desenvolvimento do projeto tendo em vista que os erros na codificação são imediatamente corrigidos à medida que são encontrados.

O processo de verificação permite analisar o modelo codificado e corrigir os erros de implementação, ou seja, os erros lógicos são encontrados, isolados e corrigidos. Em geral, os programas de simulação não são difíceis de serem verificados. Um modo clássico de verificar um programa é executá-lo em situações conhecidas onde os resultados são evidentes e podem ser facilmente calculados.

Três técnicas podem ser aplicadas para verificar um modelo de simulação [10]:

(a) Traço - É a listagem dos eventos e do estado do modelo em cada passo discreto de simulação.

(b) Animação - Detalhes dos movimentos das entidades podem ser visualizados e a lógica do programa ser verificada.

(c) Verificação realizada por uma outra pessoa com conhecimentos a respeito do sistema sendo modelado e da linguagem utilizada.



Estes três procedimentos podem ser aplicados isolados ou conjuntamente com o propósito de corrigir todos os erros na estrutura do programa.

#### 2.4.5 Validação do Modelo.

A validação do modelo de simulação é a comparação do modelo construído com o sistema real. Nesta etapa, verifica-se se o modelo representa corretamente o sistema em análise, se os resultados estimados pela simulação são confiáveis. Ver figura 2.8.

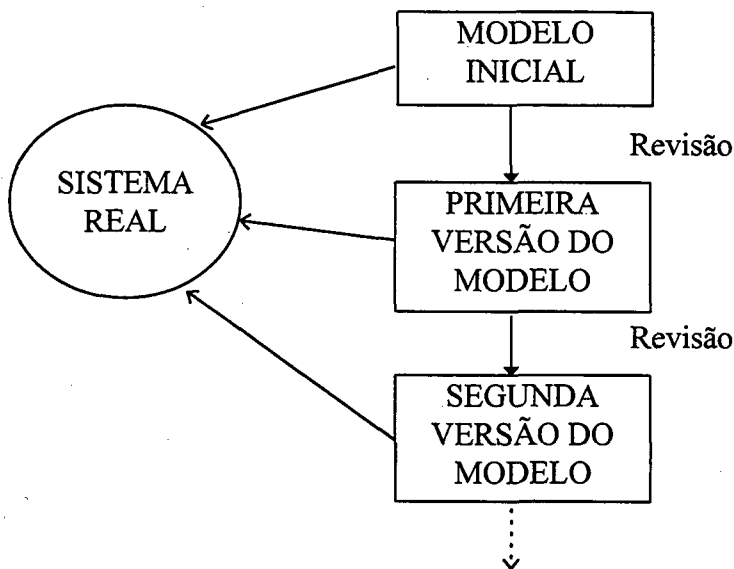


Figura 2.8 - Validação do Modelo de Simulação

O modelo deve ser aprimorado até que uma validação completa seja obtida.

A validação de um modelo de simulação é uma das fases mais importantes de um projeto de simulação. Nenhum pacote de simulação pode validar um modelo. Esta tarefa deve ser executada pelo projetista e pessoas envolvidas no projeto.

A questão, “o modelo está correto?” pode ser respondida usando métodos subjetivos (intuições ou opiniões de como o sistema funciona), e métodos objetivos (métodos de validação que permitem realizar uma comparação estatística entre os resultados do modelo e as observações realizadas no sistema real, por exemplo, testes das médias, análise de variância, etc.). As suposições, os dados de entrada do modelo e os resultados de saída devem ser revistos cuidadosamente. Além disso, uma técnica de análise de sensibilidade pode ser aplicada [13]. Variando-se os parâmetros do modelo e observando como estas mudanças afetam o seu comportamento, nós poderemos sentir os impactos sobre os parâmetros do mesmo. Se pequenas mudanças nos parâmetros forcem diferentes decisões ou implicações, deveríamos suspeitar de nossos resultados.

A animação do processo também pode ser importante para a validação, comunicando os resultados do modelo e demonstrando o escopo do mesmo. O objetivo

aqui é assegurar que o princípio de funcionamento do modelo não contradiz a realidade, ou seja, existe um mapeamento entre o modelo e o sistema referente. Esta análise deverá ser realizada por especialistas do processo real acompanhando a execução do modelo através da animação gráfica, possibilitando corrigir eventuais erros e incorporar detalhes relevantes na estrutura do modelo.

A validação é executada em dois diferentes estágios no estudo da simulação. Ver figura 2.4. A primeira validação é sobre o modelo conceitual e dados coletados, revendo as suposições e simplificações realizadas. Esta primeira validação deveria ser realizada por pessoas familiarizadas ao sistema real sendo modelado. Após a codificação e verificação do modelo, uma nova validação deverá ser realizada comparando os resultados do modelo com o do sistema real. Se validado, experimentos podem ser executados sobre o modelo. Se não validado, as fases anteriores a validação devem ser revistas incluindo a própria definição do problema.

#### 2.4.6 Projeto Experimental

O projeto experimental envolve a especificação de diferentes parâmetros de entrada do modelo, entre eles:

- Tempos de processamentos;
- Taxas de chegada de peças;
- Políticas de escalonamento;
- Número de recursos utilizados, por exemplo, número adequado de AGVs para um sistema de manufatura, etc. Para cada configuração, o modelo de simulação é executado e os resultados avaliados.

Uma questão importante nesta fase é: Como executar apropriadamente um modelo de simulação e obter os resultados. Para responder esta pergunta, recorreremos a literatura. Para maiores detalhes, ver [1], [10], [14].

A abordagem para analisar um modelo de simulação depende do sistema ser ou não terminal.

Um sistema terminal tem condições iniciais fixadas na qual o sistema sempre retorna após cada fim e um evento definindo o fim natural da simulação. Um exemplo de sistema terminal é o caso de um serviço bancário. A condição inicial fixada neste caso é o banco vazio e o evento final é o fechamento do banco após um período de serviço .

Um sistema não terminal ou não tem condições iniciais fixadas para a qual ele retorna ou um evento definindo o fim natural da simulação. Um exemplo de sistema não terminal que não fecha é o serviço hospitalar. Um exemplo de sistema não terminal que fecha mas que não possui condições iniciais fixadas é o caso de muitos sistemas de produção que fecham após um período de trabalho mas que utilizam o estoque do dia anterior como condição inicial para o dia corrente.

### 2.4.6.1 Sistemas Terminais.

Na simulação para sistemas terminais, resultados independentes podem ser obtidos pela execução da simulação usando diferentes fluxos de números aleatórios. Muito embora estes resultados possam ser autocorrelatados, eles são estatisticamente independentes. E porque estas observações são a soma ou a média de muitas observações individuais, é razoável supor que estas observações seguem uma distribuição normal, baseado no teorema do limite central.

O teorema do limite central estabelece que, se uma variável aleatória “x” puder ser representada pela soma de quaisquer “n” variáveis aleatórias independentes que satisfaçam a determinadas condições que valem na maioria das aplicações, então esta soma, para “n” suficientemente grande, terá uma distribuição normal [15].

As condições gerais podem ser resumidas da seguinte maneira: Cada parcela na soma contribui com um valor sem importância para a variação da soma, e é muito improvável que qualquer parcela isolada dê uma contribuição muito grande para a soma. Além disso, o teorema afirma que as parcelas não necessitam ser normalmente distribuídas para que a soma seja aproximada por uma distribuição normal.

Muitos procedimentos estatísticos requerem que as observações sejam normalmente distribuídas. Se nós observarmos os resultados de uma simples réplica de simulação, nós provavelmente violaremos este requisito. Entretanto, se usarmos muitas réplicas, o conjunto de todas as observações individuais (cada réplica de simulação) será normalmente distribuída, baseado no teorema do limite central.

Um exemplo de aplicação do procedimento de análise para sistemas terminais é a avaliação do tempo de espera dos clientes em uma fila de um serviço bancário. Sabemos que o sistema é terminal devido as suas condições iniciais fixadas (vazio) e a presença de um evento definido o fim do serviço (fechamento do banco) conforme já analisado. As observações coletadas dentro de uma mesma réplica de simulação são altamente dependentes, ou seja, é provável que se um cliente 1 gastar um grande tempo na fila, o cliente 2, atrás do cliente 1, também gastará um grande tempo na espera por serviço. Agora, se gerarmos 10 réplicas do modelo de simulação, sendo que cada réplica representa um dia de serviço, as observações (cada réplica gerada) serão independentes e normalmente distribuídas de acordo com o teorema do limite central. Na prática, isso significa que se um cliente gasta um grande tempo na fila no primeiro dia, obviamente não significa que o tempo de espera de um cliente 2 no segundo dia será afetado pelo primeiro. Para cada réplica do modelo, um valor médio do tempo gasto na fila é fornecido com o número de observações coletadas. Cada réplica representa, na verdade, uma amostragem com média e desvio padrão associado.

Com um número “x” de réplicas, conseguimos formar uma distribuição amostral. Da estatística sabemos que a média de uma distribuição amostral é a média populacional na

qual pretendemos determinar [30]. Assim, a média de todas as réplicas (amostragem) é o valor estimado para solucionar o problema. Ver figura 2.9.

Réplica 1 : Tempo médio - t1;

Réplica 2 : Tempo médio - t2;

:

:

:

Réplica 10: Tempo médio - t10;

$$\text{Média estimada} = \frac{t1 + t2 + \dots + t10}{10}$$

$$\text{Variância} = \frac{\sum (t_i)^2 - (\sum t_i)^2 / n}{n - 1} \quad \text{Onde "n" é o número de réplicas executadas.}$$

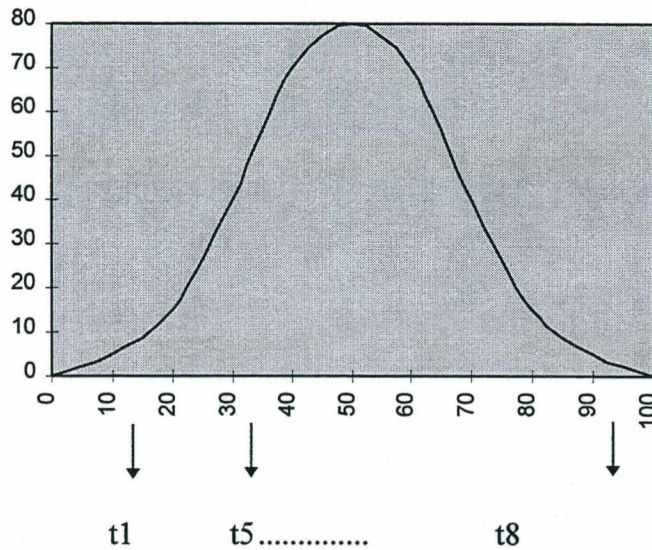


Figura 2.9 - Média das Réplicas de um Modelo de Simulação

Como o objetivo é construir intervalos de confiança para as variáveis em análise, se as suposições de normalidade não forem verificadas, ainda assim é possível construir estes intervalos e realizar testes de comparações, isso porque estes testes são robustos a esta violação de normalidade. O fundamental para estes testes é o princípio da independência das observações. Não se pode construir um intervalo de confiança para observações dependentes [1]. Por isso, com uma única réplica de simulação para os sistemas terminais onde as observações coletadas são dependentes, intervalos de confiança não podem ser construídos. Para analisar parâmetros estatísticos através destes intervalos de confiança ou

através de testes de comparações, múltiplas réplicas do modelo devem ser geradas como forma de se obter informações independentes.

#### 2.4.6.2 Sistemas não Terminais.

Na análise de sistemas não terminais não há nenhum evento que faz o sistema retornar para a condição inicial ou um evento definindo o fim de operação do sistema. Isso introduz um outro problema, desde que obviamente não podemos executar uma simulação para sempre. Assim, quando parar a simulação?

Uma outra questão importante se refere as condições iniciais tendenciosas. Geralmente, os sistemas não terminais possuem uma fase transiente que varia com as condições iniciais. Esta fase transiente influencia nos resultados finais. Por exemplo, para um sistema de manufatura, é provável que a primeira peça a ser produzida encontre o sistema descongestionado. Desta forma, medidas de desempenho como tempo médio no “buffer”, tempo médio no sistema, comprimento médio da fila, etc., estarão sendo subestimados. Assim, surge uma outra pergunta, como tratar as observações coletadas durante a fase transiente?

Para responder estas questões levantadas acima é que assumimos um procedimento metodológico que permite analisar sistemas não terminais. É importante também que, para estes sistemas, especialmente os de manufatura, o interesse em geral é realizar uma análise em regime permanente.

O primeiro passo para análise de sistemas não terminais se refere ao procedimento de isolar a fase transiente, e com isso as análises de desempenho serão feitas apenas em regime permanente. Uma das maneiras mais populares para resolver este problema é encontrar o instante de tempo onde o sistema passa do regime transitório para o regime permanente [1]. A dificuldade, na verdade, é encontrar este ponto e definir o comprimento da fase inicial (transitório do sistema). Este comprimento de tempo é chamado na literatura como o período de “warmup” da simulação, ou seja, período em que os dados da simulação são “aquecidos” ou preparados para o regime permanente.

Conhecido este ponto do tempo, todas as observações coletadas durante a fase inicial serão descartadas e assim, não influenciarão nos resultados finais da simulação.

Um procedimento para encontrar o ponto de transição entre o regime transitório e o regime permanente é através da geração de um gráfico que mostra o tempo médio gasto no sistema pelas peças, etc. Ver figura 2.10.

Com o objetivo de retirar os ruídos deste gráfico, mecanismos de suavização podem ser aplicados e o ponto identificado visualmente. Ver figura 2.11.

O regime permanente se inicia no momento em que o tempo médio gasto no sistema apresenta pequenas variações em torno de um valor médio. Outros mecanismos podem ser vistos em [1].

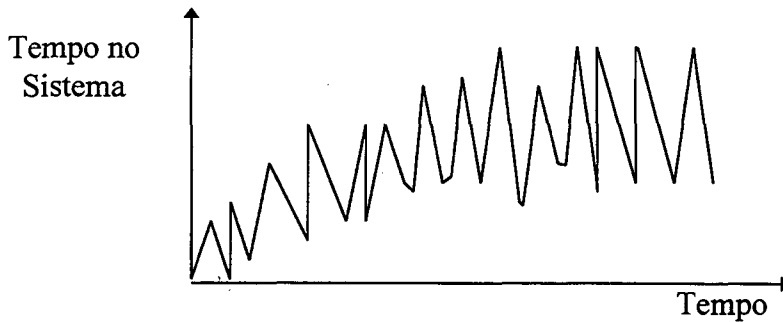


Figura 2.10 - Gráfico do Tempo Médio Gasto em um Sistema

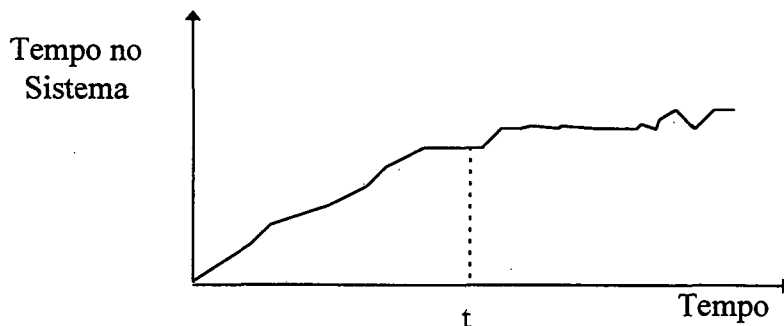


Figura 2.11 - Suavização da Curva Tempo Médio no Sistema

A outra questão, quanto tempo simular, se refere ao tempo necessário para executar um modelo de simulação de um sistema não terminal. Como visto, para sistemas terminais, o procedimento para a construção de intervalos de confiança é bastante simples porque o comprimento da simulação é conhecido e a geração de um número “x” de réplicas possibilita a obtenção de observações independentes.

Para sistemas não terminais, não há um ponto claro para definir o fim da simulação. Para abordar este problema, nós adotamos um método bastante adequado e fácil de interpretar. É o método das médias de grupos. Este método é similar ao método de réplicas independentes para sistemas terminais. Entretanto, ao invés de réplicas independentes, as observações de uma simples execução do modelo são divididas em grupos aproximadamente independentes entre si. Desta forma, nós tratamos os grupos como se fossem réplicas independentes.

Os passos para análise de um sistema não terminal são os seguintes [1]:

- (a) Assuma inicialmente que o sistema em estudo é não terminal.
- (b) Execute inicialmente uma simulação piloto com um tempo fixo. Durante esta simulação piloto, informações do tempo médio gasto no modelo de cada entidade devem ser registradas.

(c) Após a execução da simulação, um gráfico mostrando o tempo médio que as entidades permaneceram no modelo pode ser gerado. Este gráfico pode ser suavizado para uma melhor visualização como mostra a figura 2.11.

(d) Visualmente, defina o ponto do tempo onde o modelo entra em regime permanente. Este ponto definirá o período do “warmup” da simulação.

(e) As observações restantes (observações coletadas em regime permanente) precisam ser tratadas com o objetivo de torná-las estacionárias, independentes e normalmente distribuídas como requerem muitos métodos de análise estatístico. Este novo conjunto de dados (dados tratados) serão utilizados no lugar dos dados originais para análise de desempenho.

Este tratamento sobre os dados originais é referente ao processo no qual todas as observações são divididas em “n” grupos, onde cada grupo apresenta um tamanho “m”. Desta forma, o número de observações coletadas durante o regime permanente é “n $\times$ m”.

Supondo que “ $\mu_i$ ” é a média de cada grupo “i”, o método para a construção de intervalos de confiança para sistemas não terminais torna-se semelhante ao método das réplicas independentes para sistemas terminais [1].

Se os grupos forem grandes o suficiente, as médias de dois grupos adjacentes serão aproximadamente independentes entre si, mesmo que as observações finais do grupo “i” sejam correlacionadas ao grupo “i+1”. Neste ponto surge uma questão importante, Como determinar o tamanho apropriado de cada grupo de forma que as observações (médias) sejam independentes? O tamanho dos grupos é uma função da estrutura da correlação entre as observações. Assim, gera-se um correlograma das observações coletadas no regime permanente. Este correlograma permite determinar o grau de correlação entre as observações em função das suas distâncias relativas. Por exemplo, para a maioria dos sistemas, se uma peça “j” espera um longo tempo para ser processada, é provável que a peça seguinte “j+1”, com a mesma sequência de operação, terá que esperar também um longo tempo. Pode-se dizer nestes casos que as observações adjacentes são correlacionadas. Mas para a peça “j+n”, a correlação pode ser pequena ou nula em relação a peça “j”. Desta forma, o correlograma permite detectar o grau de correlação entre a peça “j” e a peça “j+n”. Ver figura 2.12.

O correlograma da figura 2.12 denota que a correlação é significativa para uma distância relativa (número de observações) menor ou igual a 20 e desprezível para uma distância relativa superior a 40. Isso significa que o tempo gasto no sistema por uma peça influenciará o tempo gasto no sistema para as peças mais próximas que a seguem, mas que não apresentará influências significativas para as peças que seguem após 40 ou mais peças na sequência.

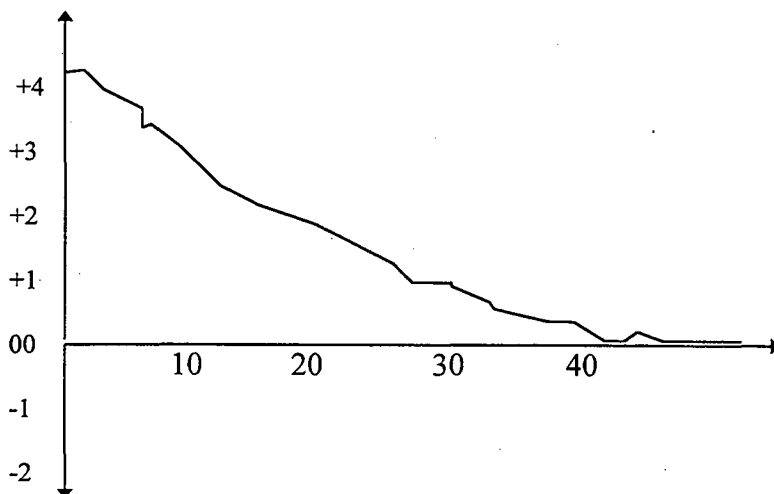


Figura 2.12 - Correlograma das Observações Registradas

Com este correlograma, pode-se determinar o tamanho de cada grupo baseado em um princípio que estabelece que o tamanho deverá ser no mínimo 10 vezes maior do que a distância relativa para a qual a correlação se anula [1],[2]. Para o exemplo das peças, a correlação se anula para uma distância relativa superior a 40. Assim, cada grupo deverá conter  $10 \times 40 = 400$  observações com média “ $\mu_i$ ”. Ver figura 2.13.

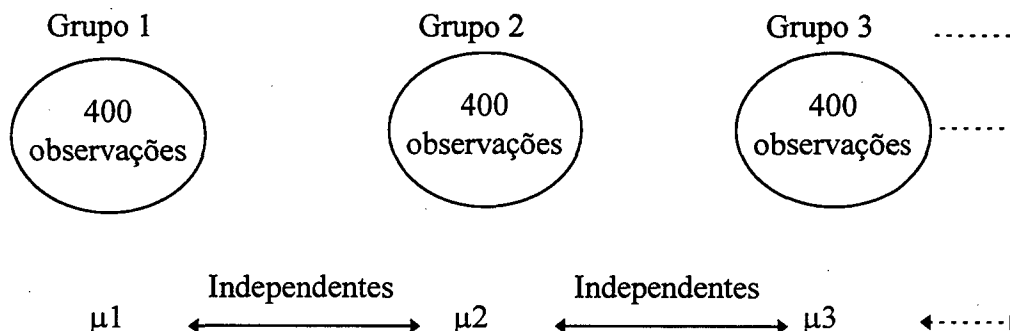


Figura 2.13 - Independência Entre os Grupos Formados

Baseado na suposição da normalidade e independência, quanto maior o tamanho dos grupos melhor. Por outro lado, se aumentarmos o tamanho dos grupos, diminuiremos o número de grupos e o resultado desta diminuição irá afetar negativamente a construção dos intervalos de confiança tendo em vista que, para um número menor de grupos (amostras), teremos um “t” estatístico maior do que o necessário conforme mostra a figura 2.14.

O ideal é manter um compromisso para que as divisões da observações formem de 10 a 20 grupos [1].



Com este mecanismo, o resultado final é semelhante ao das réplicas independentes para sistemas terminais, onde cada grupo poderia representar uma réplica do modelo e assim, testes estatísticos poderão ser executados para análise do sistema.

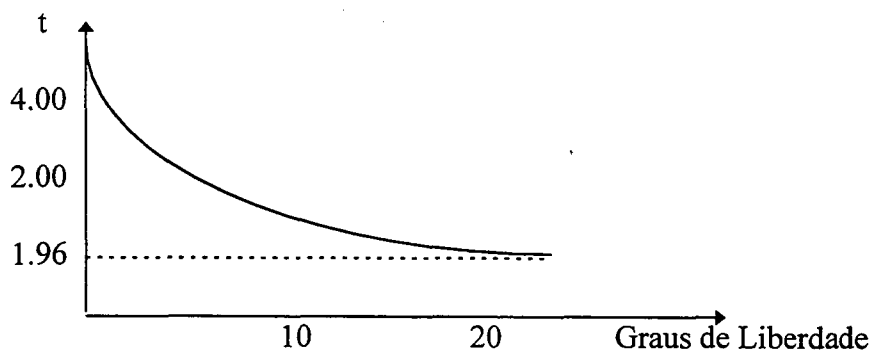


Figura 2.14 - Gráfico Função t x Graus de Liberdade

## 2.5 TENDÊNCIAS DA SIMULAÇÃO NA MANUFATURA

Por volta do ano 2000, a simulação será uma das mais poderosas ferramentas de análise e projeto de sistemas. Os programas de simulação estão cada vez mais fáceis de se utilizar, possuindo uma maior flexibilidade para a construção do modelo [17].

Os modelos de simulação também serão integrados com CAD, MRP, controle de chão de fábrica e programação de sistemas [16]. Quando mudanças forem realizadas no sistema CAD para rearranjar um “layout”, estas informações serão automaticamente refletidas no modelo de simulação através de um sistema de redes de computadores.

Outros avanços como a construção de um modelo através da tecnologia de voz e utilização de fibras ópticas para a transmissão de informações influenciarão drasticamente na tecnologia computacional e nos modelos de simulação.

## 2.6 CONCLUSÃO

Este capítulo procurou familiarizar o leitor com os principais termos utilizados no mundo da simulação, além de enfatizar a importância de uma sequência de passos detalhada e organizada com a finalidade de alcançar sucesso no desenvolvimento de um projeto.

O sucesso ou fracasso de um projeto de modelagem por simulação depende de quão bem são executadas as fases, desde a definição do sistema até execução e análise dos resultados. Parece óbvio que quanto mais erros cometemos nas fases iniciais, maiores serão as dificuldades para realizar as alterações nas fases posteriores.

# CAPÍTULO 3: OS SISTEMAS DE TRANSPORTE NA MANUFATURA

---

## 3.1 INTRODUÇÃO

**O**s sistemas de manufatura possuem uma grande variedade de atividades, entre elas: usinagens, montagens, pinturas, transportes, etc. Como os produtos manufaturados estão se tornando universais, ou seja, indústrias do mundo inteiro estão competindo pelo mercado, as companhias necessitam focalizar cada vez mais atenção para seus recursos, capacidades, estratégias de produção, etc., com o objetivo de assegurar flexibilidade e produtividade, e com isso, reagir rapidamente às mudanças de mercado.

Entre as atividades de um sistema de manufatura, o sistema de transporte se caracteriza como um item muito importante para toda a organização da produção, sendo responsável por toda a movimentação de materiais, seja para processamento, para entrega de produtos acabados, para transporte de ferramentas, etc.

Devido à importância dos sistemas de transportes na manufatura, este capítulo apresenta uma descrição desta atividade e a sua importância para um bom funcionamento da produção. A seção 3.2 descreve as funções principais e os tipos de equipamentos para manuseio (transporte) de material. A seção 3.3 tem o objetivo de apresentar as características principais de um sistema de transporte, estabelecendo alguns princípios para maior eficiência da movimentação de materiais. A seção 3.4, é uma apresentação de um sistema especializado de transporte, os AGVs, descrevendo os princípios de funcionamento e sua importância em FMS.

O objetivo deste capítulo é fornecer uma visão compreensiva da importância de um sistema de transporte para organização da produção de um sistema de manufatura, além de motivar a utilização de técnicas de modelagem que permitam estudar, analisar e projetar adequadamente os sistemas de manuseio de material.

### 3.2 FUNÇÕES E TIPOS DE EQUIPAMENTOS PARA MANUSEIO DE MATERIAIS

A função de um sistema de manuseio de material em uma fábrica é mover matérias primas, peças em processos, peças acabadas, ferramentas, etc., de um setor a outro da fábrica facilitando as operações de manufatura [19]. Esta movimentação deve ser executada de maneira econômica, segura e precisa (movimentação correta dos materiais). Para alcançar estes objetivos de transporte, um sistema de controle de chão de fábrica deve ser implementado, mantendo um registro completo de todas as operações de manuseio e os tipos de materiais em movimentação.

O transporte de materiais pode ser executado por uma grande variedade de formas disponíveis comercialmente, entre elas:

- "Conveyors" ou esteiras, projetados para transportar materiais entre posições específicas sobre caminhos fixos, geralmente em grandes quantidades ou volumes;
- Robôs Industriais, usualmente projetados para transferir um objeto (peça ou ferramenta) de um lugar para outro na área de trabalho do robô. Uma das aplicações mais comum do manuseio de material por robôs são as operações de carga e descarga de peças e/ou ferramentas de máquinas;
- Elevadores para transporte vertical;
- Guindastes para a movimentação de grandes quantidades de materiais ou materiais pesados;
- AGVs, veículos automáticos que podem transportar materiais para um número finito de estações que devem ser projetadas e programadas dentro do controlador do sistema. Um computador central controla todas as atividades dos AGVs no chão de fábrica monitorando as posições dos veículos e controlando o tráfego [32]. Maiores detalhes sobre este sistema serão vistos na seção 3.4 deste capítulo.

Devido a esta variedade de transporte de materiais, é importante que um projeto de um sistema de manufatura inclua as características de movimentação dentro da fábrica. Para FMS, por exemplo, há a necessidade de que o sistema de transporte seja flexível o suficiente para responder rapidamente a alterações no chão de fábrica. Estas alterações envolvem o movimento de materiais entre as estações de trabalho, que varia, implicando em que a intensidade de tráfego entre as estações também seja variável. Outras variáveis importantes são a forma, peso e volume dos materiais a serem movimentados. Para estes casos, há a necessidade de uma flexibilidade do sistema de transporte. Entre estas flexibilidades temos [19]:

- Flexibilidade no tráfego: É a habilidade de atender todas as estações de carga sem degradação do tempo de espera. Esta flexibilidade é resultado tanto do tamanho do

sistema em termos de capacidade (número de transportadores) quanto da capacidade de alocação de uma operação (escalonamento de ordens).

- **Flexibilidade de rota:** É a habilidade de transportar peças de uma estação para várias outras estações com decisões realizadas em função da peça em particular sendo transportada. Por exemplo, em um sistema de esteiras, a flexibilidade de rota não existe desde que ele opera entre duas posições fixas. Um AGV, entretanto, tem um alto grau de flexibilidade de rota pois as peças podem ser carregadas e descarregadas em qualquer estação.

- **Flexibilidade de caminho:** É a habilidade para selecionar o caminho de viagem entre duas estações. Tal flexibilidade admite tomada de decisão em tempo real evitando congestionamento no sistema de transporte.

- **Flexibilidade de carga:** É a habilidade de transportar cargas de diferentes tamanhos, formas e pesos.

Obviamente, estas características tão necessárias para FMS podem não ser igualmente importantes para outros sistemas. Por exemplo, em um sistema cujo fluxo de material é unidirecional, para sistemas de cargas contínuas, etc., “conveyors” mecanizados ou automatizados podem ser aplicados.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE

O planejamento para um sistema de transporte de materiais deveria começar com uma análise do material a ser transportado. Fatores como: forma física dos materiais (sólido, líquido e gasoso), volume, peso, considerações de riscos (materiais explosivos, tóxicos), etc., influenciarão no tipo de transporte a ser selecionado em um projeto. Por exemplo, para um produto líquido ou gasoso, tubos podem ser aplicados, sólidos singulares e pesados podem ser transportados por guindastes, produtos tóxicos por AGVs, etc.

Outros fatores que também devem ser considerados, além das características dos materiais são:

- A quantidade de material a ser movimentada. Se grandes quantidades de materiais precisam ser transportados, um sistema de transporte dedicado deverá ser considerado;

- Os caminhos pelos quais os materiais serão transportados. Isso inclui as distâncias de movimentação dos materiais e as condições que existem ao longo do caminho. Quanto maior a distância, maiores serão os custos com o sistema de transporte;

- Considerações do “layout”. Informações que a planta da fábrica deverá fornecer, entre elas: Localização das estações de carga e descarga de materiais; possibilidade de rotas entre as estações; distâncias a serem percorridas pelos materiais; possíveis lugares onde podem ocorrer congestionamentos; área da fábrica, etc.

Ainda nas considerações de “layout”, é importante saber qual o tipo de “layout” onde o sistema de transporte será implementado. Por exemplo, para linhas de montagem, geralmente são utilizados “conveyors” (mecanizados ou automatizados). Para células de manufatura, robôs podem executar a tarefa de transporte dentro da sua área de trabalho. Para um sistema de estoque, a movimentação de materiais pode ser realizada por veículos dirigidos por operadores humanos ou similares, incluindo os AGVs.

Entretanto, todo o projeto de um sistema de transporte pode ser facilitado se o projetista e demais pessoas envolvidas no projeto obtiverem o conhecimento dos princípios do manuseio dos materiais. Estes princípios tem sido desenvolvidos e documentados ao longo de muitos anos e muito discutidos em conferências sobre transporte na manufatura. Entre os mais importantes, temos [19]:

- Princípio da carga unitária: Os materiais a serem movimentados deveriam ser agregados dentro de unidades maiores e o tamanho das unidades deveria ser o mesmo para todos os materiais. Os materiais geralmente são colocados em “containers” (cestos, “pallets”, etc.) e o transporte é projetado para mover os “containers”. Este princípio da carga unitária poderá trazer grandes benefícios. Por exemplo, se aumentarmos o número de peças nos “containers”, a capacidade requerida para o sistema de transporte (número de transportadores) pode ser reduzida substancialmente.

- Princípio da distância mais curta: O manuseio dos materiais pode ser minimizado através de viagens mais curtas. Rearranjos de “layouts” podem facilitar o fluxo de peças dentro do sistema.

- Princípio do fluxo em linha reta: O caminho do transportador deveria ser em linha reta da origem ao destino. Esta regra é consistente com o princípio da distância mais curta.

- Princípio da mecanização: O manuseio manual de material deveria ser evitado. O processo de transporte deveria ser mecanizado ou automatizado onde possível para melhorar a eficiência do sistema.

- Princípio dos sistemas: O sistema de transporte deveria estar integrado com outras partes do sistema de manufatura como estações de carga e descarga de materiais, inspeção, estoques, etc.

A redução do manuseio de material pode ser conseguida através da utilização de centros de usinagens controlados por computador capazes de executar múltiplas operações sobre as peças, com mudanças automáticas de ferramentas e programas de carga e descarga de máquinas.

### 3.4 UM SISTEMA ESPECIALIZADO DE TRANSPORTE - AGVS

#### 3.4.1 Definição.

Os veículos guiados automaticamente, mais conhecidos como AGVs, desempenham um importante papel na manufatura porque eles são o meio de transporte mais flexível para interconectar todas as posições da fábrica, executando tanto o movimento horizontal quanto vertical dos materiais [19]. Segundo [20], um AGV é um veículo equipado com dispositivos de guia automáticos, eletromagnético ou óptico. Tal veículo é capaz de seguir caminhos pré-determinados e pode ser equipado com funções como seleção de caminhos evitando bloqueios, paradas, programação dos veículos e outras funções requisitadas pelo sistema. De acordo com esta definição, um AGV é um sistema de manuseio de material de alta tecnologia consistindo de um veículo dirigido seguindo um caminho sobre o controle do computador. Diferente de outros meios de transporte, um AGV pode selecionar seu próprio caminho entre muitas rotas possíveis para alcançar uma determinada estação de trabalho ou estoque [19]. Alguns AGVs podem alterar dinamicamente suas rotas em função de congestionamentos e rotas livres.

Esta flexibilidade faz do AGV um sistema de manuseio de materiais bastante popular para FMS ou para outros sistemas, substituindo os “conveyors” nas linhas de montagem, os elevadores, etc. A figura 3.1 mostra alguns exemplos de AGVs.

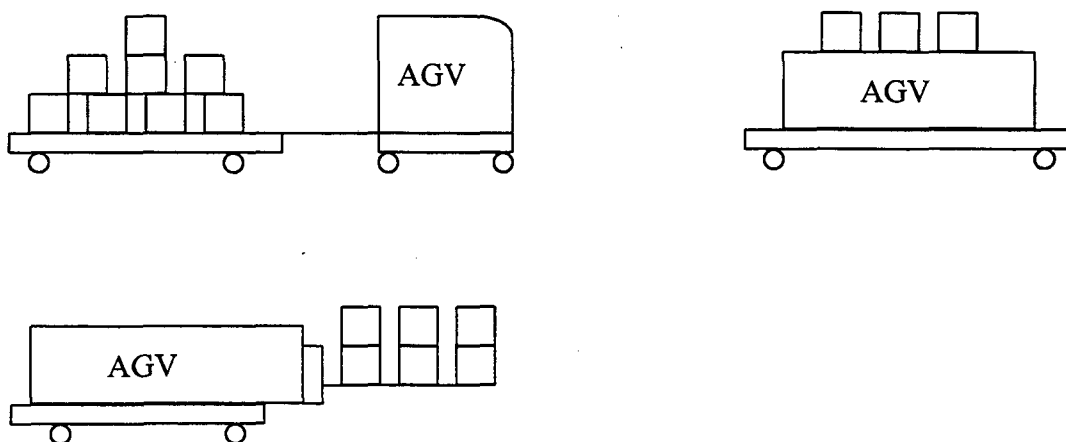


Figura 3.1 - Tipos de AGVs

Em um sistema de AGVs, as informações (comunicações) são fundamentais para um bom desempenho de todo o sistema de produção. Por exemplo, cada AGV se comunica um com outro, com os robôs, com as estações de trabalho e com o computador central para controle. Esta comunicação é que faz o AGV ser um meio de transporte bastante flexível, respondendo rapidamente às alterações de programação da produção, executando as operações de carga e descarga e selecionando os caminhos de transporte.

Geralmente nas indústrias, os AGVs são alimentados por baterias. Quando a bateria de um AGV precisa ser recarregada, o veículo é dirigido para uma estação de carga. Esta técnica retira o AGV de todos os serviços de transportes para que o mesmo possa ser “reabastecido” [20]. Uma outra técnica de mudança de bateria é realizada quando o veículo está executando ou esperando para executar uma tarefa. As estações nas quais os AGVs são requisitados a parar por um longo tempo tornam-se estações de mudança de cargas.

### 3.4.2 História dos AGVs.

O conceito de veículos guiados automaticamente foi desenvolvido nos Estados Unidos por volta de 1950 pela “Barret Electronics” [20], [21]. Nesta década, os veículos seguiam caminhos pré-determinados e podiam fazer simples decisões sobre os caminhos percorridos. Na década de 70, os microprocessadores tornaram-se populares e o seu uso como controlador de AGVs foi intensificado. Atualmente, um computador central controla todo o sistema de AGVs e um programa de controle individual de cada AGV é executado pelo microprocessador colocado no mesmo. Com estes mecanismos de controle, vantagens adicionais foram obtidas, como: comunicação em tempo real de todos os veículos, monitoramento contínuo de todos os AGVs (localização e “status”), possibilitando aos mesmos executarem eficientemente as operações de movimentação de materiais.

O fator que levou ao grande desenvolvimento dos AGVs ainda na década de 70 foi a competição no mercado forçando a redução dos custos de produção e um interesse no desenvolvimento de novas tecnologias de automação [20]. O desenvolvimento desta tecnologia resultou em veículos que, atualmente, executam funções complexas como o carregamento e descarregamento de estações de trabalho, abrem e fecham portas automaticamente e usam elevadores.

Toda esta tecnologia tem sido aplicada de muitos modos. Na indústria, os AGVs estão sendo aplicados para o transporte de produtos tóxicos, transporte em ambiente perigosos ao ser humano, para estoque de materiais e/ou ferramentas, para transporte de peças etc. Na área militar, muitos AGVs são úteis em ambientes perigosos com riscos de explosão, como por exemplo, os AGVs programado para encontrar e desativar bombas. Em hospitais, os AGVs são utilizados para o transporte de produtos usados pelos pacientes, etc.

No futuro, pretende-se desenvolver um AGV autônomo, capaz de diagnosticar suas próprias más funções, reconhecer peças e substituir montagens que apresentam defeitos.

Eles serão capazes de verificar perigos de incêndio, sabotagens e intrusões não autorizadas [20].

### 3.4.3 O Sistema de AGVs.

O sistema de AGVs deve executar 5 funções: guia, roteamento, gerenciamento de tráfego, transferência de cargas, e gerenciamento do sistema [20].

Na função de guia, o AGV deve seguir um caminho pré-determinado entre as estações origem e destino de forma otimizada para um dado material. O caminho é geralmente fixado por fios condutores colocados sob o piso da fábrica. Um campo magnético é induzido nos fios que pode ser percebido por sensores colocados sob os AGVs mantendo-os no caminho. A figura 3.2 ilustra a interação entre os fios sob o piso da fábrica e os sensores magnéticos nos AGVs.

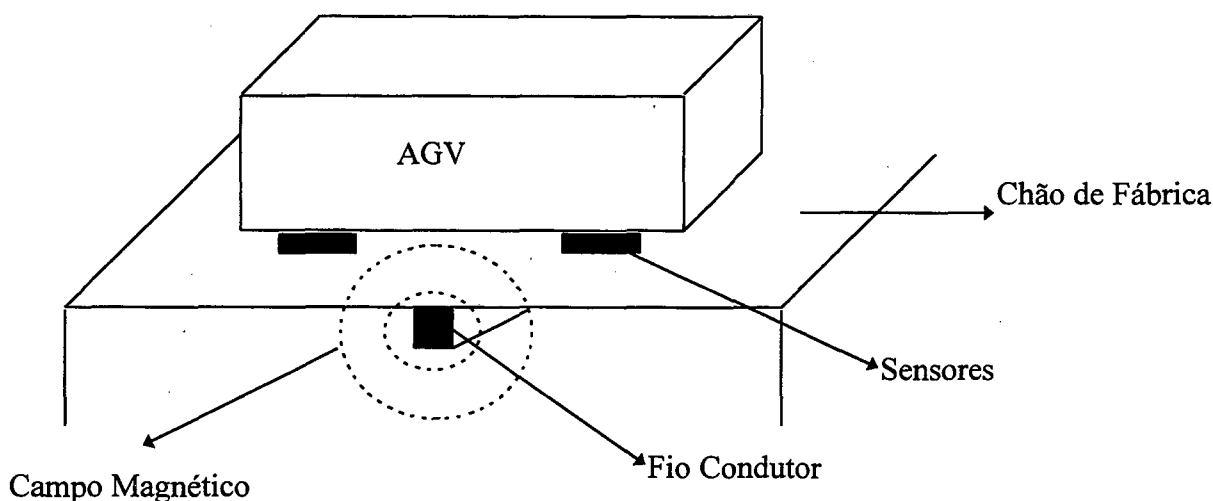


Figura 3.2 - Princípio de Funcionamento dos AGVs

Uma das principais vantagens desta técnica está na sua confiabilidade. O sistema foi testado e aprovado. Também, os fios sob o chão de fábrica são imunes a sujeiras provenientes do ambiente fabril.

Uma desvantagem seria que muitas fábricas não podem ter seus pisos abertos por motivos de instalação da fábrica, área, localização, etc.

Outras tecnologias também tem sido aplicadas: sensores ópticos sob os AGVs com uma linha pintada sobre o chão de fábrica indicando o caminho; "laser"; imagens ultrassônicas; triangulação, etc. Para maiores detalhes ver [19].

No roteamento, o AGV deve ser capaz de alterar o caminho para um determinado destino baseado nas condições atuais e nas condições de manufatura. Na figura 3.3, um exemplo para o caso de um simples AGV é mostrado. As linhas representam os fios com campos magnéticos (linhas contínuas com frequência 1 e linhas tracejadas com frequência 2). As linhas são unidas por pontos chamados de pontos de identificação da posição dos



AGVs (pontos A, B, C, D, E e F). São nestes pontos que uma informação é passada para o computador de controle geral identificando a posição do AGV no momento, e o computador retorna com uma informação direcionando o AGV ao longo do percurso (segue reto, gira para direita, para esquerda, pára, etc.). Também há os chamados pontos de decisão (pontos A e B), que além de serem pontos de identificação são também pontos de decisão (qual caminho escolher para chegar ao destino final?). Por fim, cada segmento de reta representa uma zona (zonas de 1 a 8). Se o AGV está na zona 1 e há uma ordem de transporte para o AGV na zona 6, o AGV deve passar pelos pontos A e B e tomar uma decisão baseada no critério da distância mais curta ou nas condições de tráfego, no momento em cada rota, afim de evitar congestionamentos. Além disso, o AGV deve passar por um ponto chamado de ponto de convergência (ponto D) onde dois caminhos se unem formando um só novo caminho.

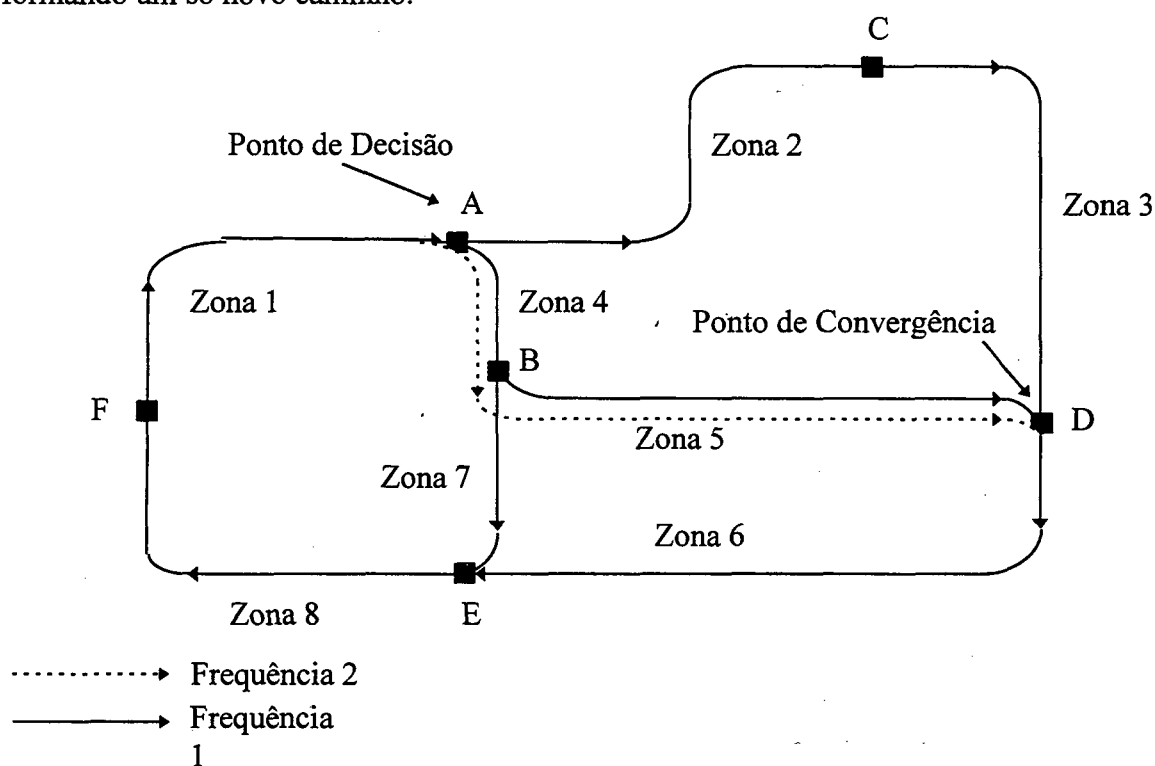


Figura 3.3 - Direcionamento dos AGVs

Uma das técnicas bastante conhecidas para seleção de caminhos é a técnica de seleção de frequência magnética dos fios embutidos. Para este caso do roteamento por frequência, o AGV é programado para seguir o fio com uma frequência que fará o veículo alcançar a próxima zona de acordo com o caminho mais curto. Para o caso da figura 3.3, para o AGV ir da zona 1 para a zona 6, o AGV deveria escolher a frequência 2 no ponto de decisão A e continuar com esta frequência no segundo ponto de decisão (ponto B). No ponto de convergência, a frequência escolhida deveria ser a 1. É importante compreender que cada ponto de decisão é um ponto no piso da fábrica por onde os AGVs passam e os fios embutidos no chão saindo destes pontos possuem diferentes frequências que são

selecionadas pelos AGVs conforme a programação. O outro método, também bastante conhecido é o de chaveamento de caminhos. Ver [20].

O sistema de controle ou gerenciamento dos AGVs deve maximizar o fluxo de materiais através da produção e minimizar os congestionamentos de veículos. Uma das técnicas bastante usadas para controle de tráfego de AGVs é o controle por zona. Quando um AGV passa por um determinado ponto de identificação e entra em uma zona, aquela zona passa a ser controlada pelo AGV em questão. O computador central gerencia para que nenhum outro AGV acesse a mesma zona, evitando assim, possíveis colisões dos veículos.

A transferência de cargas indica a capacidade do sistema de entregar e remover materiais de uma estação sem influenciar em outros sistemas de produção. Por exemplo, o AGV pode realizar um carregamento automático de materiais, ou ser carregado por esteiras, robôs, etc. Naturalmente, deverá haver uma comunicação entre o AGV e demais componentes do sistema para que uma operação sincronizada seja realizada.

As funções de gerenciamento dos AGVs inclui dois componentes básicos: a regra de escalonamento de ordens de transporte e o sistema de monitoramento das posições correntes de todos os AGVs com as condições de manufatura.

Para as regras de ordens de transporte, há duas decisões fundamentais a serem realizadas [20]:

1. A decisão que envolve qual veículo de um conjunto de veículos será selecionado para atender a uma determinada ordem. Vários critérios podem ser adotados para este caso:

1.1 Regra aleatória: Esta regra estabelece que a ordem de transporte pode ser associada a qualquer veículo na fábrica, sem levar em conta distâncias entre os AGVs e a estação origem para qual o veículo deve se dirigir.

1.2 Regra do veículo mais próximo: De acordo com esta regra, primeiro as distâncias de todos os AGVs à estação origem são calculadas. Assim que as distâncias são conhecidas, a ordem de transporte é passada para o veículo mais próximo da estação.

1.3 Regra do veículo com maior tempo de ociosidade: Esta regra associa uma prioridade mais elevada para o veículo que apresenta um período de ociosidade maior que todos os outros. A ordem é passada para este veículo independentemente da sua distância em relação a estação.

1.4 Regra do veículo menos utilizado: Semelhante ao item 1.3 mas agora considerando o percentual de utilização dos AGVs. Esta regra realiza um balanceamento de cargas entre todos os AGVs.

2. A decisão que envolve qual estação de carga atender primeiro se várias ordens de transporte chegam simultaneamente. Entre os critérios adotados, temos:

2.1 Regra aleatória: Semelhante ao caso 1.1, mas agora referindo-se às estações. De uma lista de ordens geradas, uma estação é escolhida aleatoriamente e a ordem de transporte é passada para o AGV.

2.2 Regra da menor distância: Nesta regra, a ordem de transporte liberada para o veículo é a ordem associada a estação mais próxima do AGV. A mais próxima pode ser medida em função do tempo de viagem ou de percurso com o objetivo de minimizar as distâncias de viagens dos veículos.

2.3 Regra associada ao maior tempo de viagem: Esta regra associa prioridades mais elevadas para a estação mais distante do veículo.

2.4 Regra associada ao número de peças nas estações: Para este caso, a ordem de transporte é associada a estação que apresenta um maior número de peças no “buffer”, prontas para serem transportadas, etc.

No capítulo 4, será descrito o princípio de funcionamento do sistema de AGVs da EMBRACO mostrando as principais características deste sistema de transporte.

### 3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, nós descrevemos os princípios de funcionamento de um sistema de transporte de materiais e a sua importância para um bom desempenho dos sistemas de produção. Uma grande variedade de formas de transporte estão disponíveis atualmente no mercado, aumentando a importância de um projeto detalhado para uma tomada de decisão.

Os AGVs foram vistos como uma necessidade para ambientes FMS devido a grande flexibilidade, podendo reagir de forma rápida às alterações de produção e maximizar o fluxo de materiais aumentando a produtividade.

# CAPÍTULO 4: MODELAGEM DO SISTEMA DE AGVs DA EMBRACO

---

## 4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é descrever todo o processo para a construção do modelo de simulação do sistema de transporte da EMBRACO. Para alcançar este objetivo, este capítulo está organizado da seguinte forma: Na seção 4.2, há uma descrição de todo o sistema de transporte da EMBRACO com os princípios de funcionamento dos AGVs. Ainda nesta seção, os objetivos do projeto referentes à modelagem dos AGVs são detalhados. Na seção 4.3, a abstração do sistema de transporte através de um modelo conceitual e a análise dos dados coletados são realizados. Na seção 4.4, o modelo conceitual é formalizado em uma linguagem de simulação. A metodologia empregada para a construção e análise do modelo é àquela descrita no capítulo 2. Por último, a seção 4.5 trata do desenvolvimento das etapas, como e onde as mesmas foram executadas.

## 4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

### 4.2.1 Motivação.

Devido à complexidade do sistema de transporte em um ambiente fabril e aos altos custos envolvidos, as decisões que levam a alterações no sistema devem ser baseadas na utilização de metodologias que possibilite verificar o comportamento do sistema sob diferentes condições, avaliando qual a melhor solução a ser implementada.

A utilização da técnica de modelagem como recurso para estudar um sistema de transporte de material pode ser fundamental para uma tomada de decisão. No modelo construído do sistema, testes poderão ser realizados com várias alternativas de transporte e uma destas alternativas selecionada antes que seja efetivamente implementada. A escolha da melhor alternativa deverá se basear em índices de desempenho tais como a capacidade do sistema atender a produção (quantidade e tipos de peças a serem transportadas), índices financeiros (custos envolvidos com a compra dos equipamentos), etc.

Com este procedimento, muitos benefícios podem ser obtidos, entre eles:

- Segurança e economia na tomada de decisão;

- Identificação e resolução de problemas com transporte de materiais;
- Maior entendimento do sistema de transporte;
- Possibilidade de teste de novos procedimentos de operação e transporte;
- Possibilidades de testes de novas configurações, etc.

Sabendo-se da complexidade envolvida e da necessidade de se obter modelos fidedignos do sistema real, modelos de simulação são frequentemente mais utilizados do que os modelos analíticos. Embora não forneçam soluções otimizadas como os modelos analíticos, os modelos de simulação podem ser usados como ferramenta de análise do comportamento do sistema de transporte sob determinadas condições.

É importante ter consciência de que o modelo de simulação não solucionará por si só o problema. O modelo apenas fornecerá respostas em função dos parâmetros de entrada, cabendo ao projetista e demais pessoas envolvidas no projeto definir corretamente o procedimento de simulação e análise de resultados de saída do modelo e tomar as decisões.

#### 4.2.2 Síntese.

- **Sistema em estudo:** Sistema de veículos guiados automaticamente (AGVS) da fábrica II da EMBRACO.
- **Elementos do sistema considerados no modelo:** Os veículos, as estações de carregamento e descarregamento de cestos e as esteiras transportadoras que conectam as linhas de fabricação às estações.
- **Técnica de projeto:** Modelagem por simulação.
- **Objetivo:** Avaliação de desempenho do sistema de AGVs sob determinadas condições de operação. Ver figura 4.1.

#### 4.2.3 O Sistema de AGVs da EMBRACO.

A EMBRACO (Empresa Brasileira de Compressores), localizada em Joinville - SC, é uma importante indústria no ramo de compressores herméticos para refrigeração, se caracterizando como a segunda maior produtora mundial neste setor.

Devido à concorrência de mercado, técnicas modernas para gerenciamento da manufatura estão sendo empregadas na EMBRACO, entre elas: política "just in time", células de manufatura integradas por um sistema de informação e um sistema de transporte altamente flexível, os AGVs.

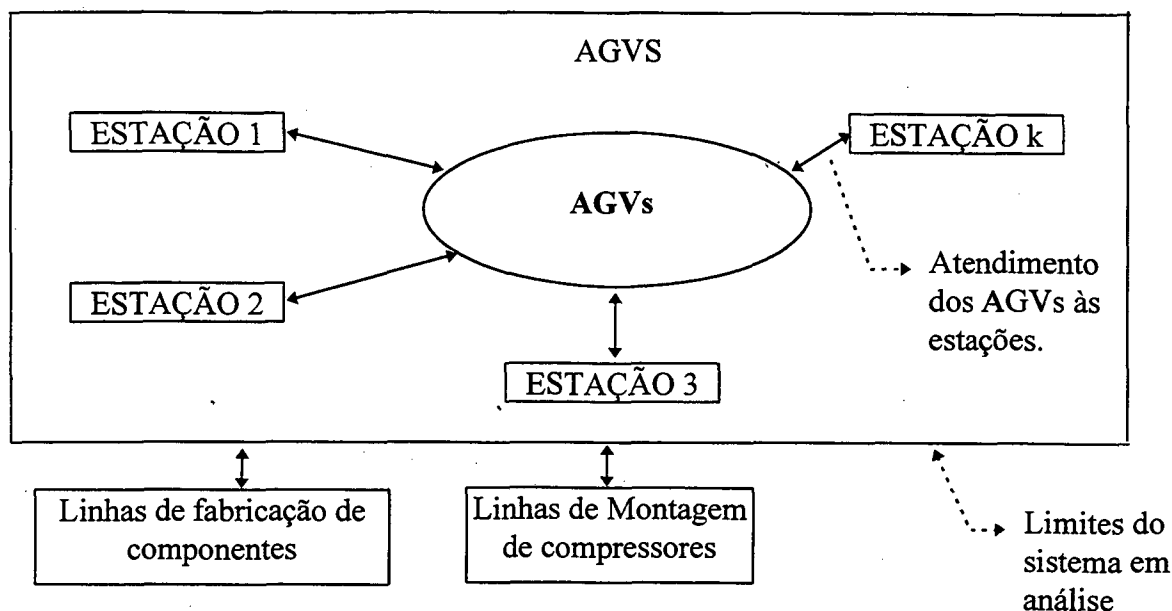


Figura 4.1 - Sistema em Análise

O sistema de AGVs da EMBRACO é constituído de 4 veículos de acionamento elétrico, diversas estações de carregamento e descarregamento de peças, portas automáticas, um CLP e um PC. Toda a tecnologia é alemã, fornecida pela empresa “Eisenmann”.

Os AGVs são guiados por meio de campos magnéticos gerados por uma corrente elétrica que passa por fios condutores enterrados no piso da fábrica. Um campo magnético é induzido pelas correntes que circulam nos fios com frequências distintas e é captado por antenas colocadas sob os AGVs. Ver figura 4.2.

Os dispositivos conhecidos como “transceivers” localizados junto ao teto da fábrica e na parte superior dos AGVs trocam sinais de infravermelho permitindo uma comunicação entre o CLP que comanda o sistema e o AGV. Ver figura 4.3.

Os veículos possuem duas posições para transporte. Cada posição pode transportar até duas pilhas horizontais de cestos metálicos ou de plástico. A figura 4.4 mostra o AGV com seus principais componentes, descritos a seguir [31].

- Sensores em pé: Estes sensores tem como função determinar se não existem cestos ("containers" utilizados para transportar as peças) para fora do AGV.
- Sensores deitados: Este sensores tem como função confirmar se existe cesto em uma posição do AGV.
- Sensor abaixo dos roletes: Este sensor tem como função posicionar o AGV corretamente nas estações.
- Roletes: Os roletes auxiliam na carga e descarga dos cestos.
- "Stoppers": Tem a função de bloquear a carga e descarga de cestos. Definem o fim de curso dos cestos.

- "Transceiver": Estabelece uma comunicação entre o CLP e o AGV através de sinais infravermelho.
- "Bumpers": Apresentam como função evitar um choque entre os AGVs e qualquer outro obstáculo no seu caminho.

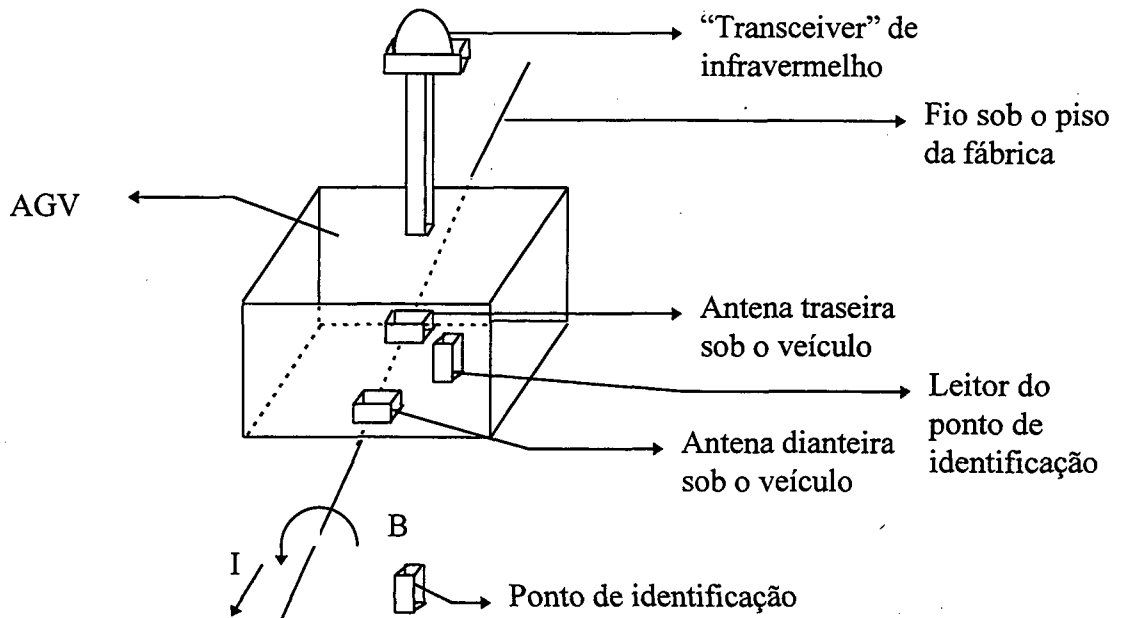


Figura 4.2 - Direcionamento dos AGVs da EMBRACO

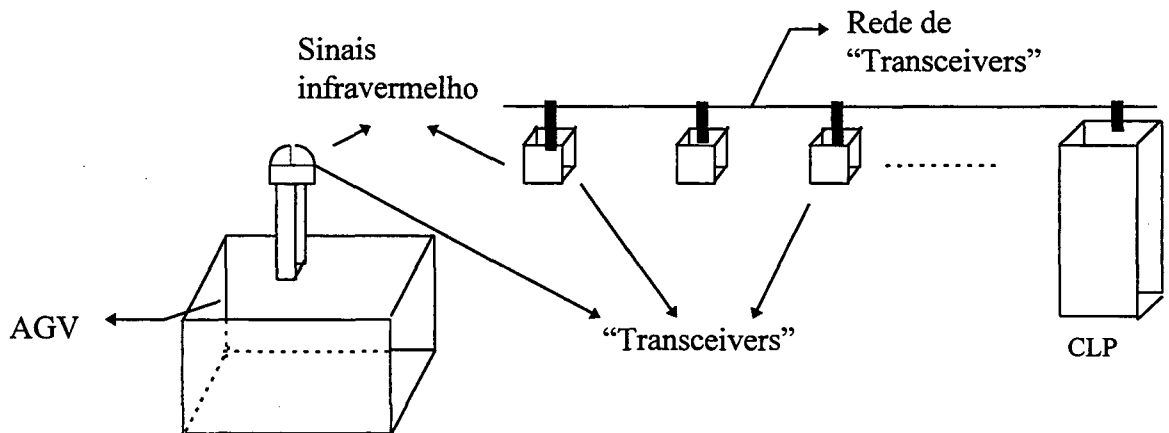


Figura 4.3 - Comunicação dos AGVs via "Transceivers"

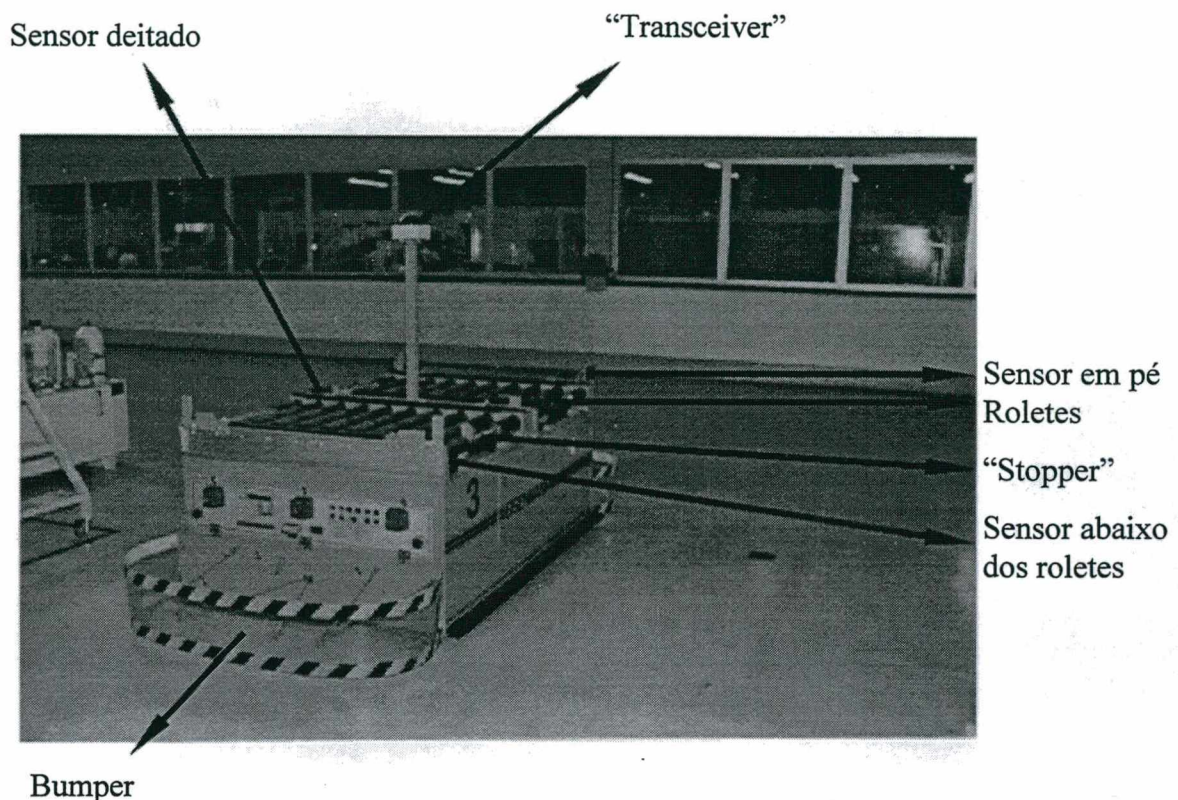


Figura 4.4 - Características de um AGV da EMBRACO

Todos os AGVs são alimentados por baterias permitindo um tempo médio de operação de 1 hora. Após este tempo, os AGVs são desabilitados para transporte e direcionados para a estação de carga de bateria. A figura 4.5 mostra o "layout" completo do sistema de transporte da EMBRACO. As estações estão generalizadas pelos nomes "Ei" e "Mi", para  $i = 1, 2, 3, \dots$ .

Cada ponto numerado do "layout" na figura 4.5 representa um ponto de identificação da posição do AGV no chão de fábrica. Estes pontos são lidos por um leitor do ponto de identificação colocado sob os AGVs conforme mostra a figura 4.2. As linhas contínuas direcionadas que passam sobre estes pontos representam os caminhos dos AGVs (fios sob o piso da fábrica) e as linhas pontilhadas representam os caminhos onde os AGVs trocam de "pista". Por exemplo, um AGV no ponto 15 deseja ir para a estação E10. Neste caso, ao atingir o ponto 11, o AGV é desviado à esquerda ficando sem orientação até encontrar o caminho que conecta os pontos 8 e 10. Quando o AGV alcança este caminho o AGV é reorientado e segue até o ponto 8 para verificar a sua posição correta e retornando a seguir em movimento contrário até atingir a estação E10.

Nos pontos de decisão, coincidentes com os pontos de identificação de onde partem mais de um caminho, uma decisão de qual caminho tomar deverá ser realizada baseada na



programação dos AGVs. Através das diferentes frequências das correntes nos fios condutores sob o piso de fábrica, os AGVs podem ser guiados e os caminhos selecionados para que alcancem o destino final. Por exemplo, um veículo no ponto 55 da figura 4.5 deseja ir para a estação M1. No ponto 55, um ponto de identificação e decisão, partem dois caminhos possíveis, um caminho com frequência F2 conectando o ponto 55 ao ponto 53 e o outro caminho com frequência F3 conectando o ponto 55 ao ponto 54. O caminho entre os pontos 57 e 55 possui uma frequência F1. Para este exemplo, de acordo com a programação do AGV, após a frequência F1, o AGV deverá seguir o caminho com frequência F3 atingindo o ponto 54 e assim, posteriormente a estação M1.

Todo o controle de tráfego, conforme já citado, é realizado pelo CLP central. Este controle é baseado na técnica de controle por zonas. Cada par de pontos de identificação da posição do AGV limita uma zona que pode ser ocupada por apenas um AGV. Ver figura 4.6.

Se uma zona de controle estiver livre, o veículo entra nesta zona e passa a ocupar este recurso até sair da mesma pelo mesmo ponto que entrou ou por um outro ponto de identificação que a limita. Se um segundo AGV tentar acessar esta zona ainda ocupada por um outro AGV, ao passar pelo ponto de identificação anterior à zona ocupada, o segundo AGV é automaticamente parado, permanecendo parado até que a zona seja liberada pelo AGV que a ocupa ou até que uma ordem para desviar o caminho seja passada do CLP para o AGV em questão. Assim, há sempre um gerenciamento por zonas, evitando possíveis colisões. Por exemplo, na figura 4.6, se um AGV está na zona limitada pelos pontos 10 e 14 e um segundo AGV deseja passar por este caminho, ele será automaticamente parado ao passar pelo ponto 8, permanecendo neste ponto até que a zona entre os pontos 10 e 14 seja liberada pelo primeiro AGV.

Quando um AGV ocioso (sem ordens de transporte) em um ponto da fábrica bloqueia a passagem de um segundo AGV com uma ordem sendo executada, o CLP envia um sinal de comando para o AGV ocioso dirigindo o veículo para uma outra posição da fábrica permitindo a passagem do segundo AGV executando uma ordem.

O objetivo do sistema de AGVs da EMBRACO é transportar peças da fabricação para a montagem de compressores utilizando os caminhos pré-definidos como visto na figura 4.5. Um “layout” simplificado é mostrado na figura 4.7, com três setores fundamentais:

- Setor de soldagem.
- Setor de usinagem.
- Setor de montagem com duas linhas de montagem de peças (compressores).

As duas linhas de montagem são separadas das linhas de fabricação (usinagem e soldagem) por portas automáticas. Esta separação é devida as condições de climatização necessárias na área de montagem (temperatura e umidade controladas). As portas abrem-se automaticamente para permitir a passagem dos AGVs, fechando em seguida.

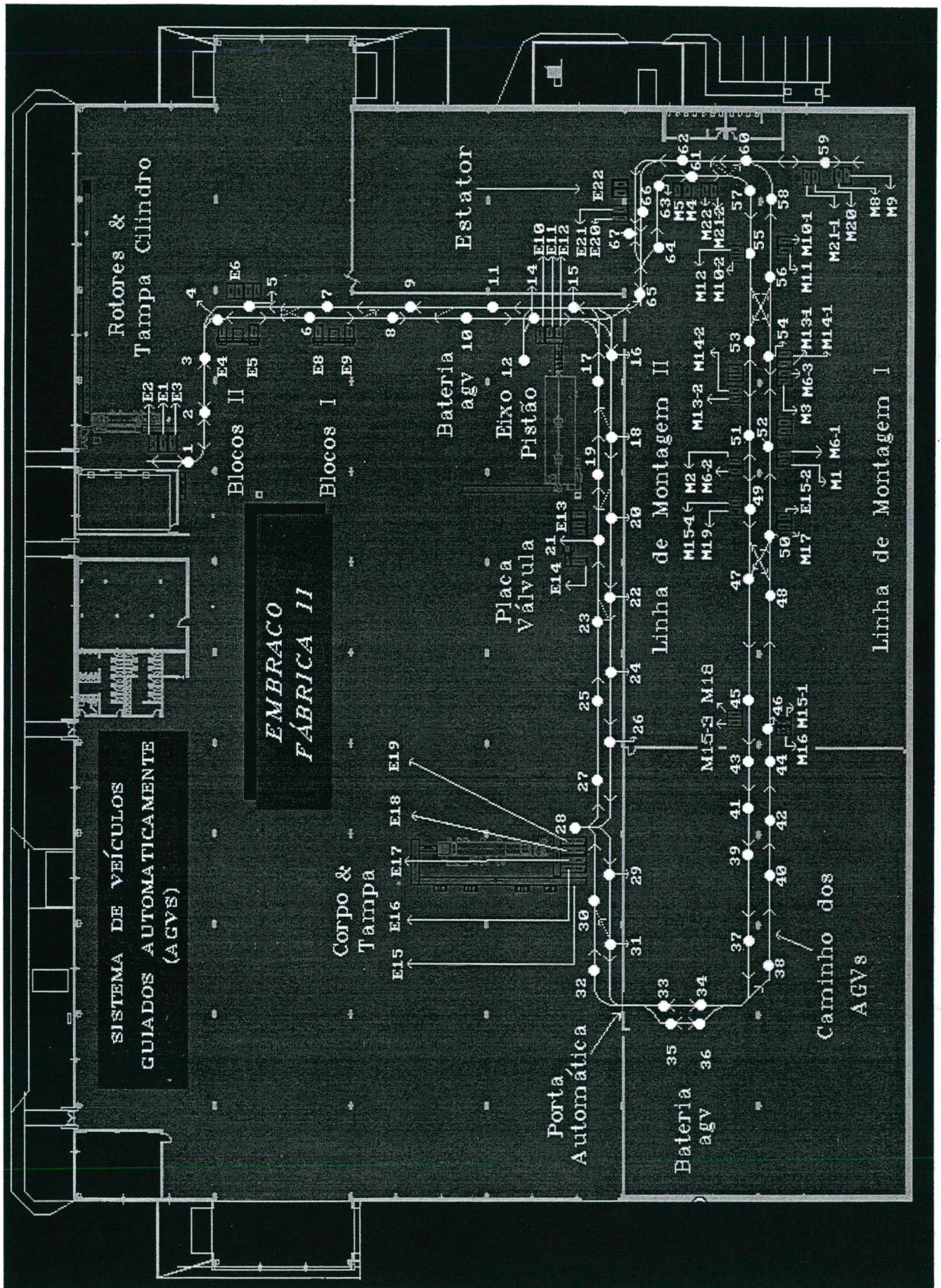
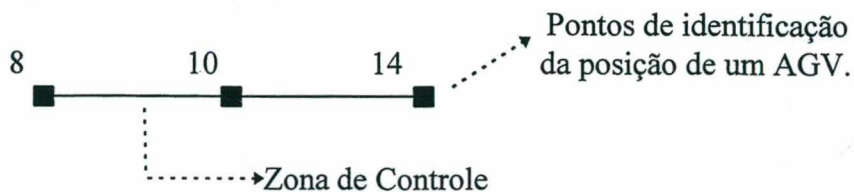


Figura 4.5 - "Layout" do Sistema de AGVs



Zona => recurso

AGV => Concorrem pelos recursos.

Figura 4.6 - Controle dos AGVs

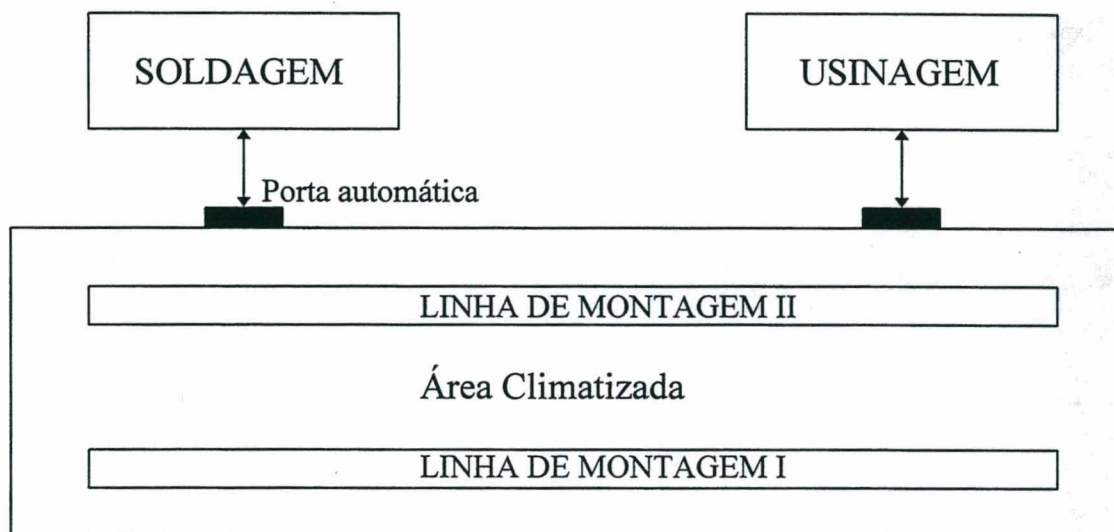


Figura 4.7 - "LayOut" da EMBRACO Simplificado

Na figura 4.5, as estações que pertencem ao setor de usinagem são: E1, E2, E3, E4, E5, E8, E9, E10, E11, E12, E13 e E14. As estações que pertencem ao setor de soldagem são: E15, E16, E17, E18 e E19. As estações que fazem parte da linha de montagem I são: M16, M15\_1, M17, M15\_2, M1, M6\_1, M3, M6\_3, M13\_1, M14\_1, M11, M10\_1, M21\_1, M20, M8, M9. As estações que fazem parte da linha de montagem II são: M15\_3, M18, M19, M15\_4, M6\_2, M2, M13\_2, M14\_2, M10\_2, M12, M21\_2, M22, M4, M5. As estações E20, E21 e E22 estão dentro da região climatizada mas fazem parte de um setor específico conhecido como setor de "estatores" (um componente de montagem do compressor). A figura 4.8 ilustra uma estação de carga e descarga de cestos [31].

Estas estações, a exemplo dos AGVs, são equipadas com:

- Roletes: Auxiliam na carga e descarga de cestos.
- "Stoppers": Bloqueiam a carga e descarga de cestos. Definem o fim de curso dos cestos.

- Espelho abaixo dos roletes: Estes espelhos tem como função refletir o sinal do AGV para que este localize corretamente a estação.

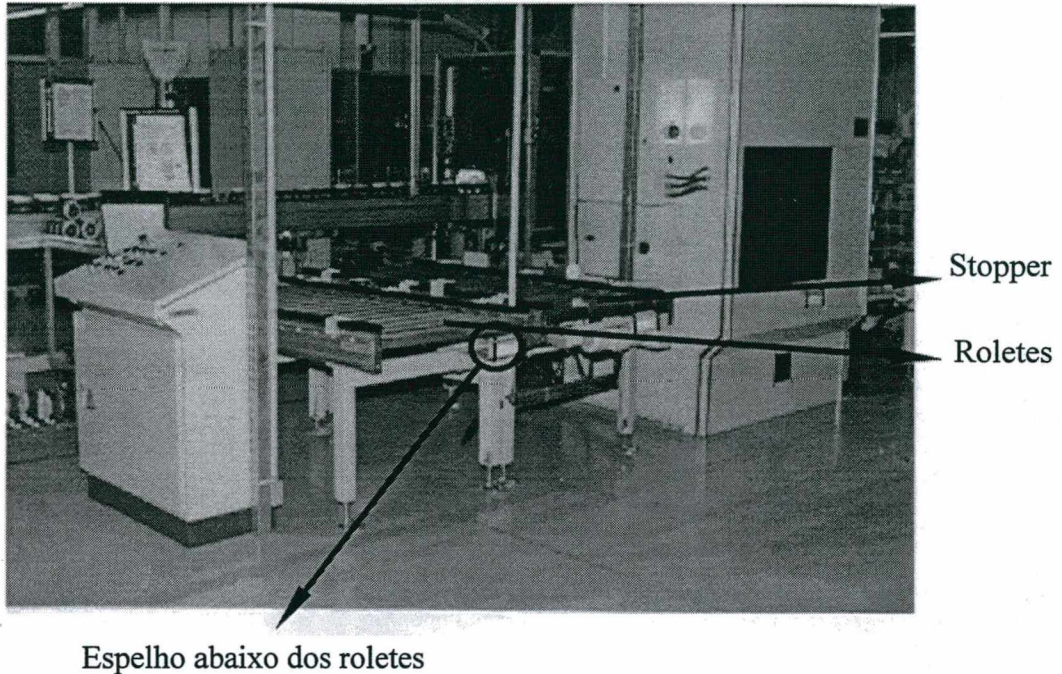


Figura 4.8 - Estação de Carga e Descarga

Na verdade, as peças não são transportadas isoladamente. Estas são colocadas em cestos metálicos formando grupos com um número variando entre 8 e 99 peças, dependendo do tamanho das mesmas. A figura 4.9 ilustra a vista superior de um cesto onde as peças são colocadas.

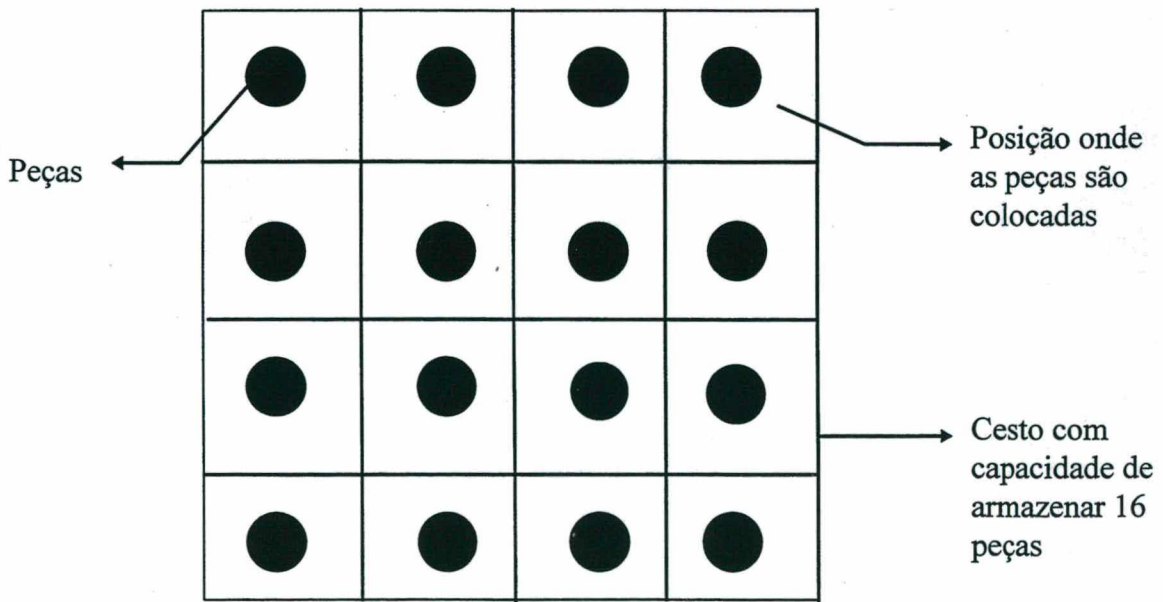


Figura 4.9 - Cesto Para Peças

Estes cestos podem ser empilhados por uma empilhadeira até uma altura máxima de 4 cestos (figura 4.10).

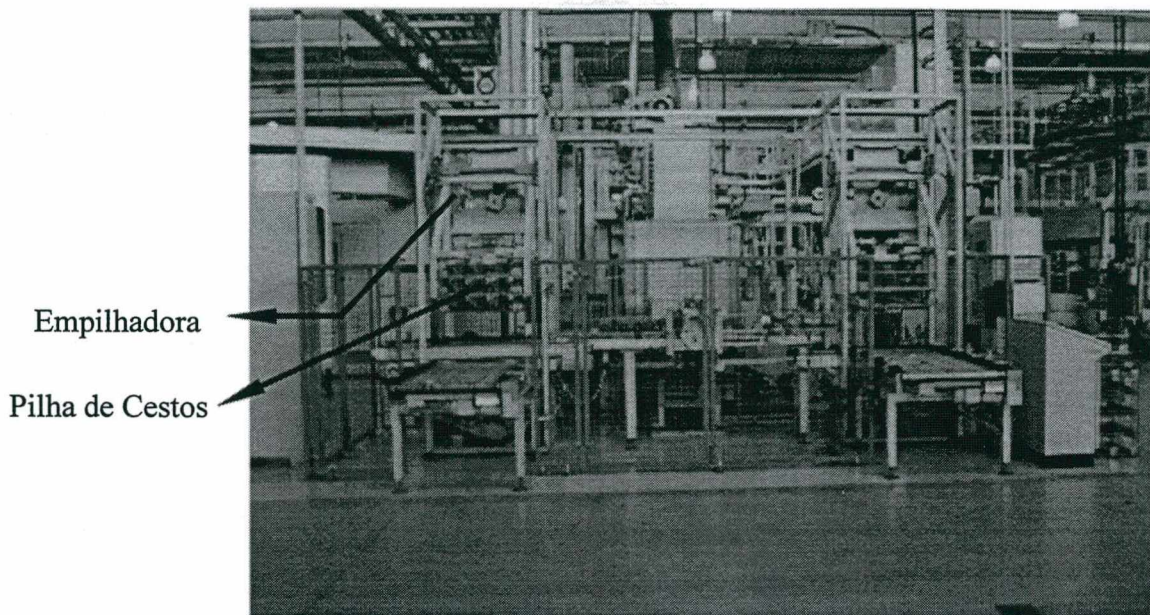


Figura 4.10 - Pilha Vertical de Cestos

Uma observação importante é que os cestos são transportados sempre aos pares (estação deve sempre conter 2 cestos em linha) independentemente do empilhamento vertical, mesmo porque, em algumas estações, este tipo de empilhamento não é realizado.

Uma outra ilustração pode ser vista na figura 4.11 onde um AGV está se posicionando para carregar cestos vazios em uma estação de carga.

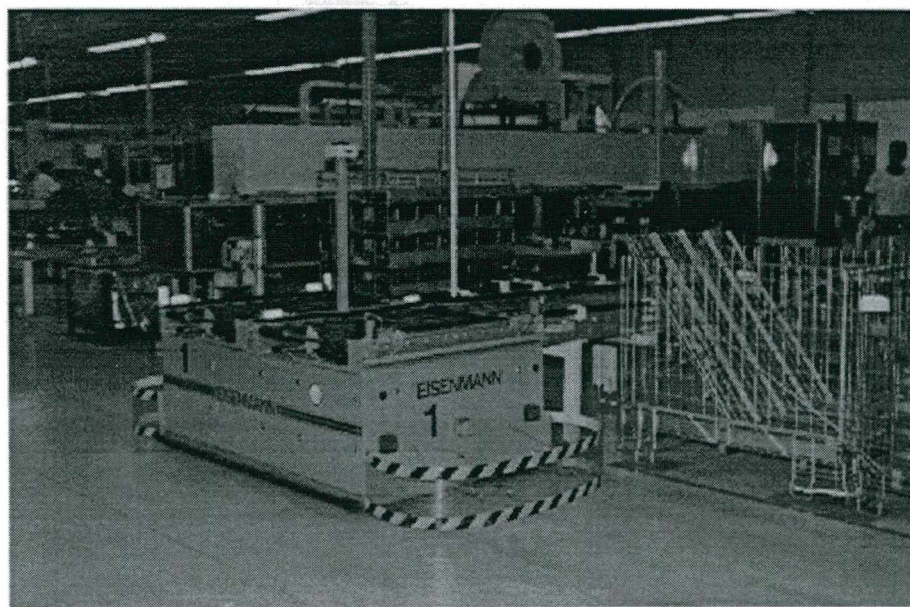


Figura 4.11 - AGV Carregando Cestos

Cada estação na linha de montagem está ligada logicamente a alguma estação da área de fabricação de componentes. Os cestos carregados em uma estação da área de componentes são transportados pelos AGVs até uma estação específica da linha de montagem onde são descarregados. O mesmo processo de transporte ocorre para o transporte de cestos vazios de uma estação da linha de montagem para uma estação da área de fabricação de componentes.

Pela figura 4.5, a estação E1 da usinagem está logicamente conectada à estação M1 da montagem. Assim, quando um AGV selecionado busca os cestos em E1 ele deve transportar os cestos para a estação M1 da linha de montagem I. Vazios, os cestos são colocados na estação M6\_1. Esta estação está logicamente conectada à estação E6, repetindo-se o procedimento para transporte dos cestos.

Em um outro caso, quando há disponibilidade de cestos na estação E16 da soldagem, os cestos aí colocados serão transportados até a estação M16 da linha de montagem I. Quando vazios, os cestos são colocados na estação M15\_1 e são transportados até a estação E15 (estação de cestos vazios do setor de soldagem).

Esta ligação lógica serve para todas as demais estações. Um resumo das ligações lógicas é mostrado a seguir:

1. Transporte de cestos carregados: E1 -> M1; E2 -> M2; E3 -> M3; E5 -> M5; E9 -> M9; E11 -> M11; E12 -> M12; E14 -> M14\_1 e M14\_2; E16 -> M16; E17 -> M17; E18 -> M18; E19 -> M19; E20 -> M20; E22 -> M22;

2. Transporte de cestos vazios: M4 -> E4; M6\_1, M6\_2 e M6\_3 -> E6; M10\_1 e M10\_2 -> E10; M13\_1 e M13\_2 -> E13; M8 -> E8; M21\_1 e M21\_2 -> E21; M15\_1, M15\_2, M15\_3 e M15\_4 -> E15.

Uma estação da produção pode estar logicamente conectada a duas estações da montagem e vice-versa.

#### **4.2.4 Política de Escalonamento de Ordens de Transporte.**

##### **4.2.4.1 Geração de Ordens de Transporte.**

Há uma separação lógica entre os AGVs. Os AGVs de número 2 e 4 atendem o setor de soldagem (corpo e tampa) da fábrica, enquanto que os AGVs de número 1 e 3 atendem a usinagem e rotores. Ver figura 4.12.

Todo o sistema de atendimento funciona baseado no critério de ordens de transporte. Uma ordem de transporte é constituída por uma estação de carga (origem) onde o AGV deverá pegar os cestos e uma estação de descarga (destino) onde o AGV deverá entregar os cestos.

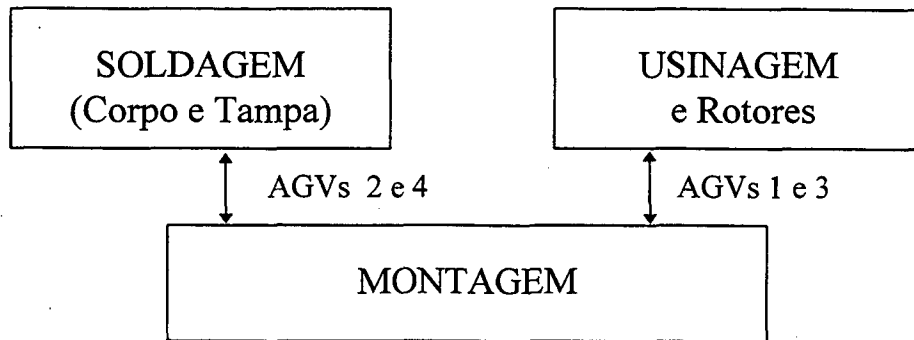


Figura 4.12 - Política de Escalonamento

Há certas condições para gerar uma ordem de transporte:

- Temporização;
- A estação de carga possui duas pilhas horizontais de cestos a transportar;
- A estação de descarga possui duas posições vazias. Estas estações possuem uma capacidade para armazenar até 3 pilhas horizontais de cestos;
- Nenhum AGV está transportando cestos para a estação destino.

Quando estas condições forem satisfeitas, uma ordem de transporte é colocada em um “buffer” de ordens. Como é o CLP que controla todos os AGVs (posição, roteamento, etc.), a distribuição de ordens para um determinado AGV também é executada pelo CLP.

Como o CLP realiza esta distribuição de ordens? A cada 10 milissegundos, o CLP “varre” o “buffer” de ordens procurando atender todas as ordens nele armazenadas. Esta procura é realizada numa política FIFO, muito embora a execução das ordens não seja.

O esquema para a execução das ordens é o seguinte: Suponhamos que todas as condições de transporte sejam satisfeitas. Então uma ordem de transporte é gerada e colocada no “buffer” de ordens. Quando o CLP começa a “varrer” o “buffer”, ele começa pela ordem mais antiga. Ver figura 4.13.

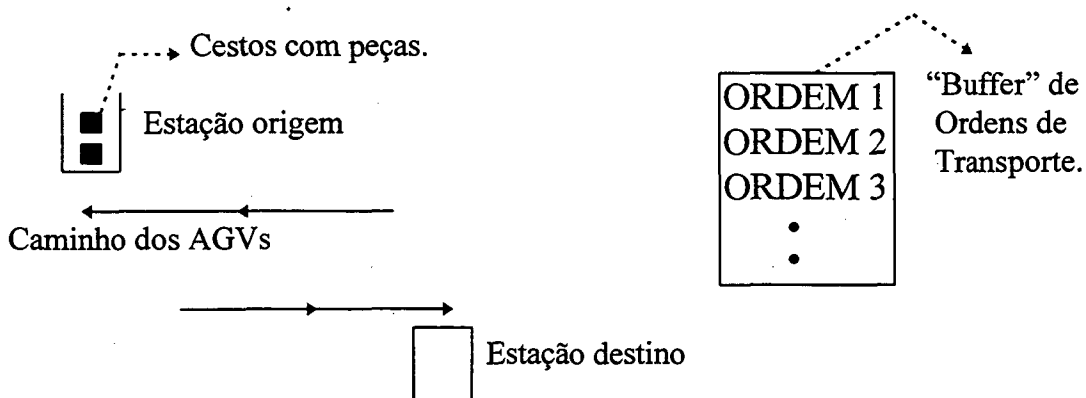


Figura 4.13 - Execução de Ordens de Transporte

Como cada ordem de transporte possui o nome da estação origem onde algum AGV deverá buscar os cestos (vazios ou carregados), o CLP começa um processo de busca ao longo dos caminhos no chão de fábrica por um AGV que possua uma posição de transporte ociosa. Esta procura se realiza, nos primeiros 10 segundos, até o primeiro ponto de identificação no sentido oposto ao movimento dos AGVs para a estação origem. Ver figura 4.14.

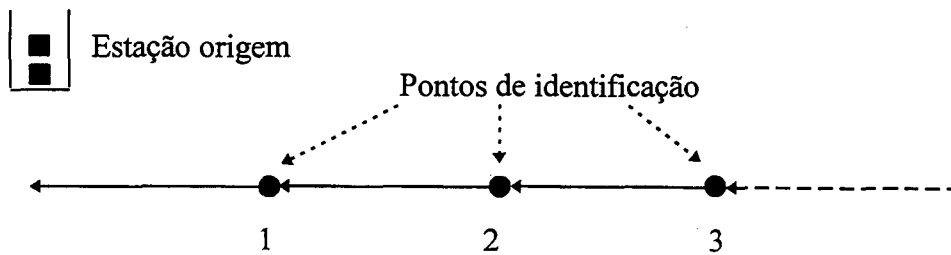


Figura 4.14 - Procura por um AGV no Chão de Fábrica

Se no momento em que o CLP passa pela primeira ordem nenhum AGV é encontrado neste trecho, o CLP tenta executar a segunda ordem, realizando o mesmo processo de pesquisa. Se novamente nenhum AGV foi encontrado, o CLP tenta executar, a terceira, a quarta ordem e assim por diante. Se nenhuma ordem é executada, a próxima “varredura” no “buffer” será realizada 10 milissegundos mais tarde, iniciando novamente pela primeira ordem. Quando completados 10 segundos de procura por um AGV em um intervalo de comprimento (zona), há um aumento de prioridade de execução da ordem e a pesquisa no chão de fábrica se estende agora, até o segundo ponto de identificação no sentido do movimento do AGV para a estação, e assim por diante. Ou seja, a cada 10 segundos, há um aumento de prioridade de execução da ordem de transporte, aumentando em um passo a pesquisa realizada na fábrica. Este aumento de prioridade é realizado individualmente para cada ordem de transporte armazenada no “buffer” assim que o tempo de 10 segundos se esgotar. Este processo continua até que um AGV com uma posição ociosa seja encontrado. Observação: a pesquisa se realiza no caminho entre a estação e o ponto de identificação e não apenas neste ponto, e em cada incremento de prioridade, a pesquisa passa a ser realizada até o próxima zona de controle incluindo as zonas anteriores já pesquisadas.

Em um exemplo, suponhamos que um AGV ocioso esteja a 4 pontos de distância da estação origem que possui cestos disponíveis e que uma ordem de transporte foi gerada. Ver figura 4.15. Nos primeiros 10 segundos, a pesquisa se realiza até o primeiro ponto de identificação (2). Após este período, a pesquisa se realiza até o segundo ponto de identificação durante os próximos 10 segundos. Passados os 20 segundos iniciais, a pesquisa se realiza até o terceiro ponto e assim sucessivamente até encontrar o AGV na posição 5. Para este exemplo, o tempo total de pesquisa foi de 40 segundos e foi suposto também que o AGV ficou parado (sem nenhuma ordem de transporte) no ponto 5.



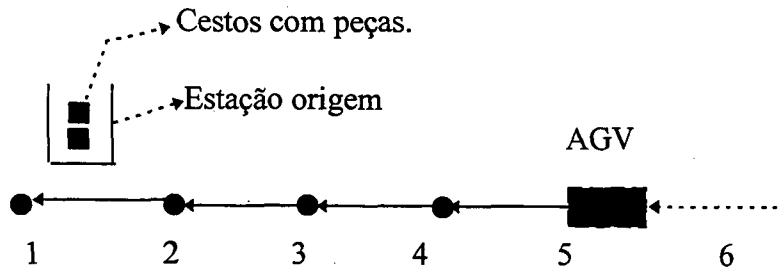


Figura 4.15 - Exemplo do Processo de Busca por um AGV

Este processo se repete para todas as outras ordens colocadas no “buffer”.

Uma observação importante é que, para caminhos bidirecionais, a pesquisa se realiza nos dois sentidos e para caminhos unidirecionais em apenas um sentido. No ponto onde dois caminhos se unem formando um só, a pesquisa a partir deste ponto é realizada paralelamente nos dois caminhos. Ver figura 4.16.

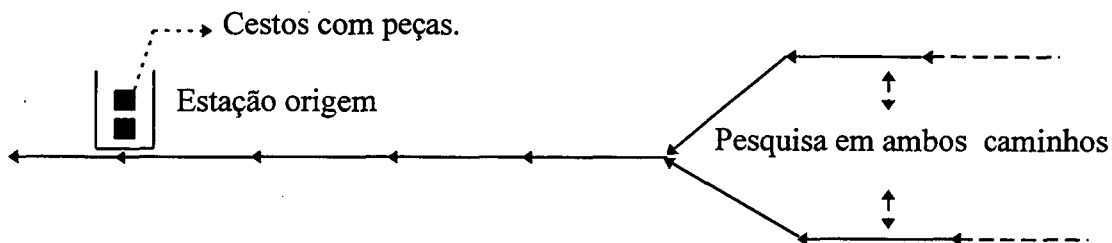


Figura 4.16 - Pesquisa em Caminhos Paralelos

Pela figura 4.5, o caminho inicial de onde começa a procura por um AGV depende da estação origem. Por exemplo, para a estação E1, a procura inicial ocorre até o ponto de identificação igual a 1. O mesmo acontecendo para E2 e E3. Quando o tempo de 10 segundos for esgotado, a pesquisa se estende até o ponto de identificação 2. Passados mais 10 segundos e nenhum AGV é encontrado, a pesquisa se estende até o ponto 3. Continuando neste procedimento de aumentar um ponto de identificação a cada 10 segundos (aumento de prioridade), a sequência de pontos na procura por AGVs fica estabelecida nesta ordem: até os pontos 4 e 5 (pesquisa paralela); 7; 9; 11; 15; 16 e 65; 18; 20 e 21; 23; 19; 17; 14; 12 (bateria) e 10; 8; 6; 4;

A pesquisa paralela ocorre nos pontos onde há uma divisão de caminhos. Por exemplo, quando a pesquisa alcança o ponto 15, após 10 segundos, a pesquisa se estende até o ponto 65 e paralelamente até o ponto 16. A pesquisa não avança o ponto 65 (porta automática) até que uma pesquisa completa tenha sido realizada no setor de usinagem. Se nenhum AGV for encontrado, então a pesquisa passa a ser realizada também na montagem procurando por um AGV ocioso na seguinte sequência: até os pontos de identificação 66 e 67; posteriormente até o ponto 62 e assim sucessivamente, 60; 58 e 59; 56; 54 e 53; 51 e 52 e 55; 50 e 49; 57; 61; 63; 64; 65; 66 e 67.....

Para o setor de soldagem, ver figura 4.17, o procedimento é semelhante. Incrementando a pesquisa a cada 10 segundos, a sequência dos pontos de identificação na procura por um AGV são: até o ponto 30 nos primeiros 10 segundos; até os pontos 31 e 32 nos próximos 10 segundos, e assim sucessivamente. Ver figura 4.5. Até os pontos 29 e 33; 28, 34, 35 e 36; 37; 39; 41; 43; 45; 47; 49 (incluindo as estações M19 e M15\_4) e 50 (incluindo as estações M17 e M15\_2); 48; 46; 44; 42; 40 e 38; 35 e 36; 37, etc.. A pesquisa até os pontos 29 e 33, significa que a procura por um AGV ocioso ocorre paralelamente até os pontos 29 e 33. Se dois AGVs forem encontrados, o CLP seleciona o AGV mais favorável (mais próximo) para buscar os cestos.

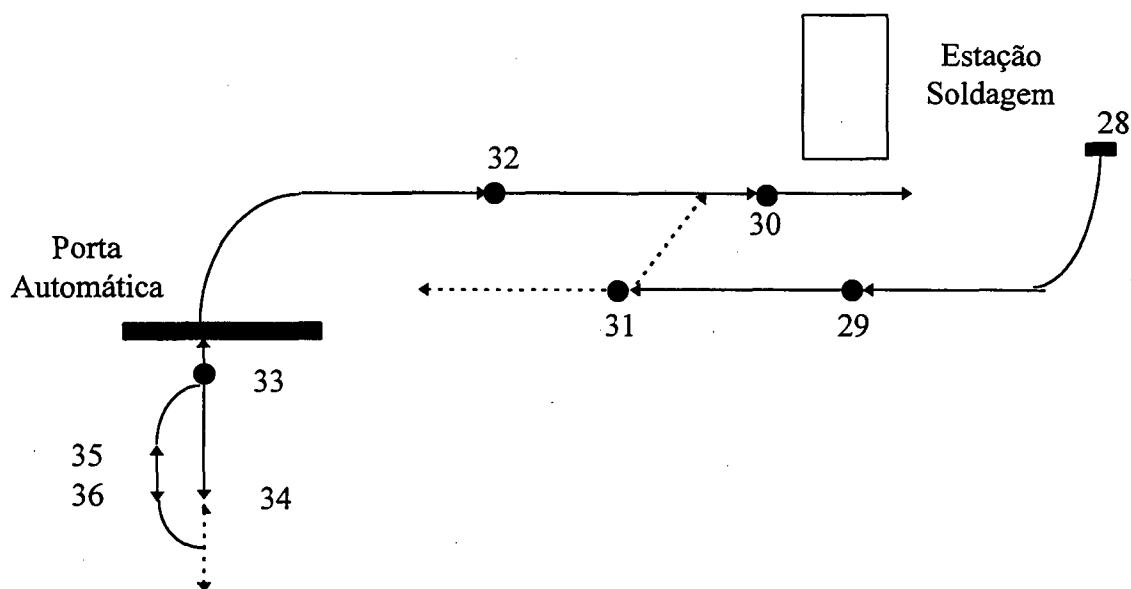


Figura 4.17 - Pesquisa de Caminhos no Setor de Soldagem

Se a procura por um AGV ocorre na montagem (cestos vazios disponíveis em uma estação), a sequência de pontos de identificação é a mesma para os casos colocados anteriormente, variando apenas o caminho inicial. Há, entretanto, algumas diferenças quando a procura por um AGV no chão de fábrica é realizada a partir das estações M15\_1, M15\_2, M15\_3 e M15\_4 (estações de cestos vazios). Para estes casos, a procura por um AGV em uma determinada zona ocorre durante um tempo de 1 minuto e não de 10 segundos como nos casos anteriores, ou seja, para estas estações, o aumento de prioridade ocorre a cada 1 minuto.

Observe que, como os AGVs geralmente estão em movimento, a pesquisa ao longo dos caminhos não se estende por distâncias muito grandes. Um outro ponto importante é quando duas ou mais pesquisas estão sendo realizadas em um mesmo caminho, correspondendo a duas ou mais ordens de transporte. Se um AGV com uma unidade ociosa acessar este caminho, o CLP executará a ordem de transporte mais prioritária, ou seja, a primeira ordem do "buffer" (FIFO), a mais antiga.

#### 4.2.4.2 Atendimento dos AGVs às Estações.

Outra questão igualmente importante é a do atendimento dos AGVs às estações quando os veículos estão com duas ordens de transporte a serem executadas. Como cada AGV tem duas posições de transporte, cada veículo pode receber até 2 ordens.

O princípio de atendimento dos AGVs às estações é o seguinte: Se o AGV estiver ocioso (sem nenhuma ordem), quando uma ordem for passada do CLP para este AGV, a ordem será para o AGV carregar primeiramente a parte da frente. Se uma segunda ordem chegar para este mesmo AGV, a ordem será para carregar a parte de trás. Mas quem o AGV atenderá primeiro? Para este caso no qual o AGV está vazio, o AGV atenderá primeiro a ordem referente ao carregamento da parte da frente e depois a ordem referente a parte de trás. Por exemplo, na figura 4.5, um AGV ocioso no ponto de identificação 6 recebe uma ordem de transporte para carregar cestos na estação E14. Esta ordem irá para a parte da frente do AGV. Suponhamos que quase no mesmo instante o AGV recebe uma segunda ordem para carregar cestos na estação E1, apesar da distância do AGV até E1 ser menor do que a distância do mesmo até E14, o AGV irá primeiro carregar a parte da frente e depois retornará até a estação E1 para carregar os cestos aí colocados. Mas, se a segunda ordem de transporte for referente à estação E11, posicionada no caminho do AGV para a estação E14, o AGV naturalmente irá carregar primeiro a parte de trás e depois a parte da frente.

Se um AGV, que estiver com apenas uma posição ocupada na produção e ainda não tenha ultrapassado a porta automática que separa a fabricação das linhas de montagem, receber uma ordem, ele retornará para a estação para buscar os cestos. A idéia é fazer com que os AGVs circulem entre a montagem e a fabricação sempre carregados com cestos (cestos com peças ou vazios).

Quando o AGV ultrapassar a porta automática ligando a fabricação à montagem em qualquer direção, as ordens de transporte referentes às estações nos setores onde estão os AGVs possuem maior prioridade de execução, independente da posição das ordens no “buffer” de ordens. Por exemplo, para um AGV no setor de soldagem, as ordens para buscar os cestos nas estações que compõem este setor são prioritárias a todas as demais ordens. Para um AGV no setor de montagem, as ordens para buscar os cestos nas estações deste setor são prioritárias a todas as outras ordens vindas da fabricação.

Quando o AGV está com as duas posições ocupadas, quem será descarregado primeiro, a parte da frente ou a parte de trás? Esta questão dependerá da posição do AGV na fábrica e dos destinos associados a parte da frente e traseira do AGV. Por exemplo, suponhamos que o destino dos cestos na parte de trás do AGV seja a estação M12 (linha de montagem II), conforme mostra a figura 4.5, e os cestos da parte da frente possuem a estação M1 (linha de montagem I) como destino. Se o AGV sai da fabricação com estes destinos, o AGV irá descarregar a parte traseira primeiro e depois seguirá para descarregar a parte da frente. No momento que o AGV descarregou os cestos da parte de trás, o AGV já

está disponível para receber uma outra ordem enquanto transporta os cestos da parte da frente para a estação destino. Se uma ordem for passada do CLP para o AGV pegar cestos vazios na estação M13\_2, por exemplo, o AGV irá até esta estação para carregar os cestos aí colocados e depois transportará os cestos da parte da frente para a estação destino M1. Por outro lado, se a ordem for para pegar cestos vazios na estação M10\_1, o AGV irá primeiro transportar os cestos da parte da frente até a estação M1.

Em geral, continua valendo a opção de descarregar primeiro a parte da frente, mas esta regra varia muito de acordo com a posição dos AGVs na fábrica. Na verdade, cada ordem passada do CLP para o AGV apresenta um conjunto de regras com certas prioridades de execução e estas regras são alteradas dinamicamente em função das condições de produção, posição dos AGVs, etc. Por exemplo, quando um AGV sai da montagem para a produção acessando a porta automática (ponto 65 da figura 4.5) com as duas posições de transporte ocupadas, sendo uma dessas posições contendo cestos vazios a serem transportados até a estação E13. Independentemente da posição em que estes cestos vazios se encontram (frente ou traseira), o AGV irá primeiro atender esta ordem para descarregar os cestos na estação E13, e depois irá atender a segunda ordem.

Uma outra situação acontece quando um AGV sai da montagem para a fabricação (porta automática, ponto 65 da figura 4.5) com uma posição livre e outra ocupada com cestos vazios para serem transportados até a estação E10. Segundo a política de escalonamento implementada, o AGV não é direcionado inicialmente para esta estação. Ele percorrerá o caminho 15, 11,... até o ponto 5 na tentativa de receber uma ordem de transporte. Se uma ordem de transporte for passada para este AGV, ele será direcionado para a estação onde os cestos se encontram e para qual a ordem foi gerada. Caso contrário, o AGV retornará pelo caminho 8, 10 até alcançar a estação E10.

Uma regra que nunca muda é a seguinte: Sempre que um AGV, independente da posição de transporte (frente ou trás) estiver carregado com cestos contendo peças conhecidas como estatores das estações E20 ou E22, a regra prioritária é primeiro transportar os estatores para o seu destino final (estações M20 ou M22 correspondendo as linhas de montagens I e II respectivamente). Isso acontece porque os estatores são tipos de peças que não podem sair da região climatizada da fábrica.

Desta forma, tanto a política de escalonamento de ordens quanto a política de atendimento dos AGVs às estações ficam perfeitamente definidas.

#### **4.2.5 Objetivos do Projeto.**

Um outro ponto importante nesta fase após o conhecimento completo do sistema é a definição dos objetivos. O que se pretende alcançar no projeto?

Entre os objetivos colocados pelos engenheiros da EMBRACO temos:

i. Verificar se o sistema de AGVs atende a uma produção de 400 peças/hora (capacidade nominal da fábrica). A análise foi realizada sobre um conjunto de parâmetros (índices de desempenho) para uma avaliação da capacidade do sistema de AGVs:

- Percentual de tempo em que os AGVs executam ordens de transporte e aquele em que os AGVs estão sem ordens.

Tempo que o AGV executa ordem x 100%

Tempo Total de Simulação

Tempo que o AGV não executa ordem x 100%

Tempo Total de Simulação

Entende-se por "Tempo que o AGV executa Ordem", o somatório dos tempos em que o AGV executa uma ou duas ordens de transporte, ou ainda, uma ordem de carga rápida de bateria. Por outro lado, no "Tempo em que o AGV não executa ordem", estão incluídos os tempos em que o AGV se movimenta para liberar a passagem para um outro.

- Percentual de tempo que cada AGV executa uma e duas ordens de transporte.

Tempo que o AGV executa 1 ordem x 100%

Tempo de em que o carro executa ordem de transporte

Tempo que o AGV executa 2 ordens x 100%

Tempo de em que o carro executa ordem de transporte

- Percentual de utilização dos AGVs com: 0 ordem de transporte e 0 carga (sem cestos sobre o AGV); 1 ordem e 0 carga; 2 ordens e 0 carga; 1 ordem e 1 carga; 2 ordens e 1 carga; 2 ordens e 2 cargas.

- Percentual de tempo em que cada AGV está em carga rápida de bateria (desativado para receber ordens de transporte).

- Número médio de cestos acumulados nas estações de carga.

- Tempo que uma estação da linha de montagem permanece sem cestos cheios para descarregar (falta de componentes na montagem).

- Distância que os AGVs percorrem após um tempo de simulação.

Número de cestos entregues (para cada componente) nas estações das linhas de montagem.

Tempo médio que os AGVs ficam bloqueados (tempo em que o AGV aguarda para a liberação de uma passagem).

ii. Verificar a possibilidade de caminhos mais curtos por parte dos AGVs (otimização das viagens).

Estes objetivos foram especificados na fase inicial do projeto e afirmados durante o desenvolvimento do projeto.

### 4.3 DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL E COLETA DE DADOS

Nesta etapa do desenvolvimento do modelo de simulação dos AGVs, a preocupação fundamental é referente a três questões básicas:

- (a) O que modelar?
- (b) Como modelar?
- (c) Como coletar dados do sistema?

A finalidade desta fase é a construção de um modelo conceitual que permita definir corretamente o escopo e o nível do modelo necessários para alcançar os objetivos do projeto e analisar os dados coletados do sistema através de uma função de distribuição de probabilidade.

#### 4.3.1 Escopo.

Todo o projeto de modelagem e avaliação de desempenho é referente ao sistema de transporte (AGVs) da EMBRACO.

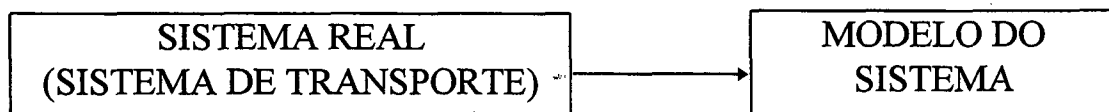


Figura 4.18 - Escopo do Modelo do AGVS

Embora todo o sistema esteja intrinsecamente conectado ao setor de transporte, os limites do sistema considerado são as estações de carga e descarga de cestos.

Muitas peças são transportadas por esteiras da produção até a estação de carga passando por algumas operações (desengraxe, fosfatização, etc.). Estas operações também serão modeladas, fazendo parte da alimentação de peças às estações.

Simplificadamente:

SISTEMA EM ESTUDO = AGVs + ESTAÇÕES DE CARGA/DESCARGA

O que deverá ser incluído no modelo de simulação?

1. **Recursos:**
  - . 4 veículos de transporte (AGVs).
  - . Estações de carga e descarga de cestos.
  - . Estações de carga de bateria dos AGVs.
  - . CLP, controlando todas as funções dos AGVs.
  - . Esteiras que alimentam algumas estações de carga.

Ver figura 4.19.

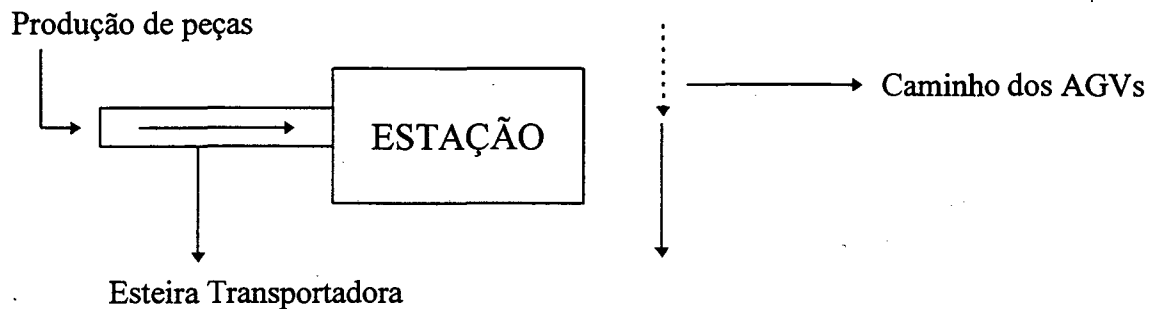


Figura 4.19 - Recursos Incluídos no Modelo

2. **Entidades:** Cestos metálicos.

Dependendo da aplicação, o uso de uma entidade para representar uma única peça pode criar uma situação em que faltam recursos computacionais (memória) para a execução do modelo. Para evitar este tipo de problema, adotou-se um método de abstração baseado na composição de elementos, ou seja, cada entidade fluindo no modelo representa um cesto metálico.

Com este princípio de abstração, além do número de entidades dentro do modelo ser menor, uma redução significativa do número de eventos é obtida. Ver figura 4.20.

#### 4.3.2 Como modelar?

Para responder esta pergunta, adotou-se o seguinte princípio: Modelar todo o sistema de transporte com a menor quantidade de detalhes possível sem interferir negativamente nos objetivos do projeto.

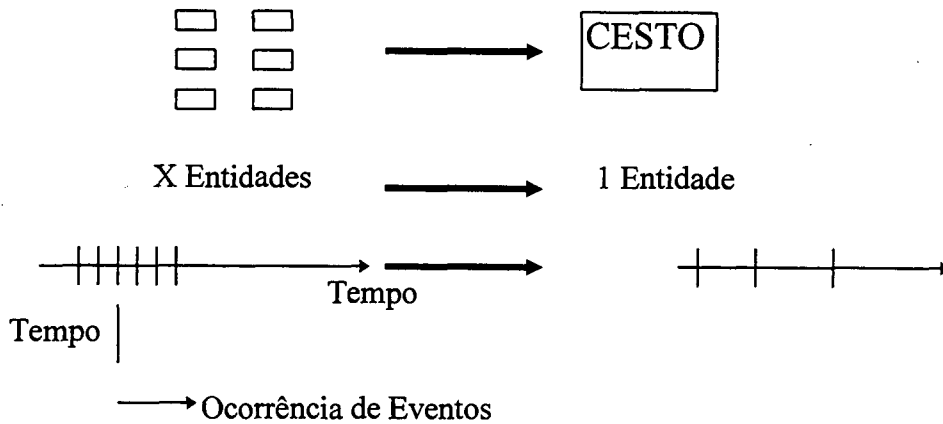


Figura 4.20 - Composição das Entidades no Modelo

Este princípio é fundamental para a "saúde" do modelo, isso porque há uma tendência de transferir todos os problemas do sistema real, de forma detalhada, para o modelo, na esperança de que o computador de alguma forma solucione o problema.

Assim, o modelo incluiu apenas aspectos relevantes aos objetivos e detalhes excessivos não foram considerados.

Em relação ao escopo, os **níveis de detalhes** considerados são:

1. Todos os AGVs são individualizados, identificados pelo número: AGV 1; AGV 2; AGV 3; AGV 4;
2. Cada veículo possui duas posições de transporte (parte da frente e parte de trás do AGV) onde os cestos são colocados;
3. Cada unidade de transporte geralmente apresenta destinos diferentes;
4. AGVs devem ser recarregados com bateria após um determinado tempo de operação;
5. Em algumas estações, operações de empilhamento de cestos são realizadas antes destes serem transportados. O número de cestos empilhados é uma variável que pode ser ajustada no início da simulação;
6. Todos os caminhos, direções, velocidades dos AGVs, zonas de controle, comprimentos são considerados;



7. Todo o sistema de controle dos AGVs realizado pelo CLP central (roteamento, controle de tráfego, etc.), além das políticas de escalonamento de ordens e atendimento dos AGVs às estações são considerados.

Entre as **simplificações** realizadas, temos:

1. Aceleração e desaceleração dos AGVs desconsideradas. Motivo: Falta de dados disponíveis e dificuldade de obtenção dos mesmos. Entretanto, os tempos envolvidos na aceleração e desaceleração estão incorporados aproximadamente nos tempos de carga e descarga de cestos nas estações;

2. As distâncias entre as estações de carga e descarga de cestos para o mesmo tipo de peça nas linhas de montagem são desconsideradas (geralmente distâncias de 90 cm). Estas distâncias são distribuídas entre os caminhos laterais à estação. Esta simplificação reduz significativamente o número de caminhos modelados, diminuindo o tamanho da matriz de valores que armazena as distâncias entre todas as estações. Ver figura 4.21.

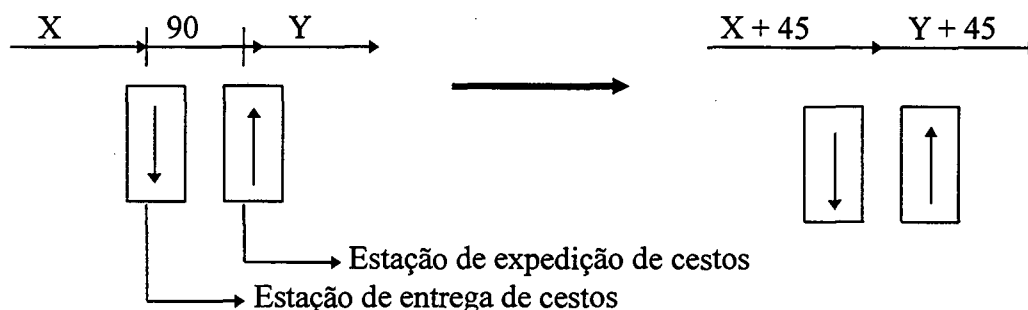


Figura 4.21 - Simplificação das Distâncias Entre as Estações (Carga/Descarga)

3. Independente da posição dos cestos no AGV (frente ou trás), o AGV sempre viaja até o ponto central da estação. Não há um posicionamento da parte da frente ou de trás do AGV para carga ou descarga de cestos, mas sim de todo o AGV. Isto é consequência direta do item anterior;

4. Não são considerados qualquer tipo de quebra dos AGVs e nem outras interrupções no seu funcionamento por qualquer outro motivo. Os AGVs podem estar apenas em três estados: Ocioso, esperando por uma ordem de transporte; ocupado, realizando uma tarefa; ou inativo quando está sendo recarregado com bateria;

5. Para o caso da política de escalonamento, o CLP "varre" o "buffer" a cada 10 milissegundos. Com o propósito de reduzir o número de eventos dentro do modelo, neste a varredura ocorre a cada 10 segundos. Esta simplificação pode provocar pequenos erros, isso porque no intervalo de tempo entre "varredura" do "buffer" (10 segundos), a pesquisa

realizada no piso da fábrica pode perder um AGV que está se movimentando em determinada zona;

6. Quebras ou outras interrupções nas estações de carga e descarga são desconsideradas;

7. Quando um AGV no sistema real fica sem receber ordens durante um intervalo de tempo (aproximadamente 5 minutos), o AGV entra em um estado conhecido como “Slumber”, onde há consumo mínimo de bateria. Quando o AGV entra neste estado e recebe uma ordem, há um pequeno intervalo de tempo para o AGV sair deste estado e atender a ordem de transporte. Este detalhe não é considerado dentro do modelo, mesmo porque, para uma produção em regime permanente e em grande quantidade, dificilmente qualquer AGV ficará mais de 5 minutos parado sem receber qualquer ordem;

8. Operações individualizadas sobre as peças são desconsideradas. Isto está de acordo com o que foi definido no escopo para representar as entidades no modelo;

9. Outros fatores externos ao sistema de transporte são desconsiderados, por exemplo, paradas na linhas de montagem, falta de material, etc.

Com o escopo e o nível definidos, a necessidade inicial de uma representação mais abstrata e simplificada do sistema é suprida utilizando um diagrama de blocos que representa o processo sendo modelado. Este diagrama simplificado pode ser visto na figura 4.22.

As entidades (cestos) são criadas no modelo e tem os valores de seus atributos ajustados a determinados valores como forma de identificar cada tipo de entidade fluindo no modelo. As entidades que alocam uma posição na estação são colocadas em uma fila de espera (estação de carregamento) aguardando as condições de transporte serem satisfeitas. Quando estas condições forem satisfeitas, é gerada uma ordem de transporte que é colocada no “buffer” de ordens. O CLP então, verificando a condição de “buffer” não vazio, começa a “varrer” o mesmo a cada intervalo de tempo de forma a atender esta ordem. A cada 10 segundos ocorre um aumento de prioridade e a pesquisa por um AGV aumenta em um ponto de identificação.

Quando um AGV ocioso é encontrado, a ordem de transporte é passada do CLP para o AGV (ordem retirada do “buffer”). O AGV se movimenta até a estação origem da ordem, aloca as entidades aí colocadas e se dirige para a estação destino da ordem. Quando o AGV chega no seu destino final, as entidades são colocadas na estação liberando o AGV.

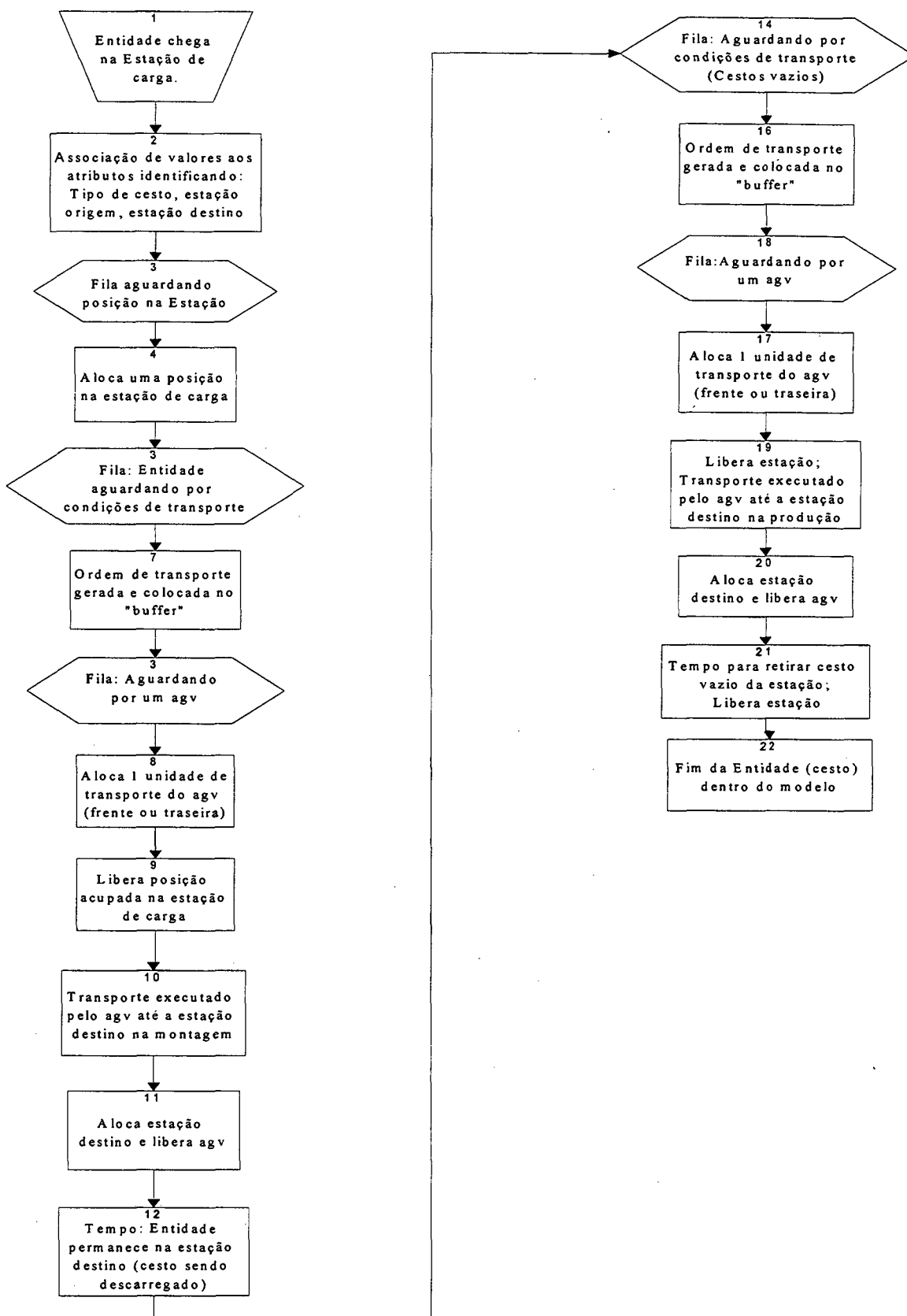


Figura 4.22 - Diagrama de Blocos do Processo de Transporte por AGVs

As entidades (cestos) permanecem na estação durante um determinado tempo modelando o descarregamento dos cestos que, quando vazios, são colocados na estação para expedição. Pelo mesmo processo anterior de geração de ordens e alocação do AGV, as entidades que agora representam os cestos vazios são transportados até uma estação onde serão novamente recarregados (fim da entidade no modelo).

Através do diagrama de blocos da figura 4.22, as relações lógicas entre os elementos essenciais do modelo ficam estabelecidas. Toda a codificação realizada na fase seguinte está baseada neste processo. No entanto, este diagrama não permite identificar as rotas dos AGVs quando estes se movimentam da estação origem até a estação destino. Neste caso, é de fundamental importância ter o controle dos caminhos dos AGVs como forma de evitar qualquer tipo de bloqueio no sistema.

Pelo fato do sistema de AGVs exibir um comportamento com características concorrentes, sincronizadas, e aleatórias, um modelo de rede de Petri foi construído [20], [22], [23],[24], [25] e [26]. Uma análise global do sistema através da rede de Petri é intratável devido à complexidade do sistema. No entanto, uma análise localizada permite estudar e verificar o comportamento do sistema onde há possibilidades de bloqueios devido ao compartilhamento de recursos. Por exemplo, nos caminhos bidirecionais e nos cruzamentos por onde passam os AGVs. Nestes pontos, é fundamental garantir uma lógica correta afim de evitar erros na etapa seguinte de programação.

Primeiramente, onde os bloqueios podem acontecer no sistema? Os bloqueios podem acontecer em todos os caminhos bidirecionais. Por exemplo, nos caminhos conectando a fabricação com as linhas de montagem através das portas automáticas, nos pontos de cruzamento e troca de pista. Este caminhos podem ser visualizados na figura 4.5. Para cada uma destas localizações, uma rede de Petri foi construída de acordo com o mecanismo de controle de bloqueios do sistema de AGVs da EMBRACO. É importante observar que estas redes representam apenas um modelo simplificado (abstrato) para facilitar a programação (codificação do modelo). Não foi o objetivo construir um modelo completo considerando todos os detalhes de implementação, como por exemplo, a inclusão da temporização na rede para representar o movimento dos AGVs, outras variáveis envolvidas no controle dos veículos, etc..

Recorrendo novamente a figura 4.5, pode-se constatar que os caminhos que conectam a fabricação com as linhas de montagem são pontos onde bloqueios podem acontecer. Por exemplo, o AGV 1 no ponto 66 está parado aguardando o AGV 3 passar pela porta automática, enquanto o AGV 3 está no ponto 14 esperando que o AGV 1 acesse primeiro a porta. Neste caso, temos um exemplo em que ambos os AGVs irão esperar indefinidamente um pelo outro, caracterizando um bloqueio no sistema. Situações semelhantes podem acontecer nos pontos 31 e 37 (acesso a porta automática conectando o setor de soldagem com as linhas de montagem. Para estes dois casos, as figuras 4.23 e 4.24 mostram as respectivas redes de Petri e as análises realizadas. Estes modelos simplificados podem ser utilizados como ponto base para outros caminhos bidirecionais, caso sejam

adicionados no sistema real. Estas redes de Petri são modelos que representam a lógica de controle implementada na EMBRACO como já documentado, ou seja, dado o mecanismo de controle dos AGVs na fábrica, uma rede de Petri foi construída e analisada utilizando a ferramenta “PESIM”.

Todos os demais pontos de interesse onde os bloqueios podem acontecer são pontos de troca de pista, onde um AGV em um caminho com sentido único é redirecionado para um outro de sentido contrário. Nestes pontos, é importante que um AGV, ao realizar a troca de pista, tenha o controle da zona seguinte, no caminho oposto. Veja figura 4.25. Neste exemplo, um AGV está redirecionado para atingir a estação G. Para realizar a troca de pista, há a necessidade que o AGV controle as zonas entre os pontos A e B, entre B e C e também entre D e E, evitando assim, possíveis colisões. Por outro lado, se houver um outro AGV em uma destas zonas citadas anteriormente, o AGV que irá trocar de pista deverá esperar no ponto D até receber um sinal do CLP para poder prosseguir no seu caminho. A rede de Petri que modela os pontos de troca de pista está representado na figura 4.26. Toda a lógica está baseada na figura 4.25.

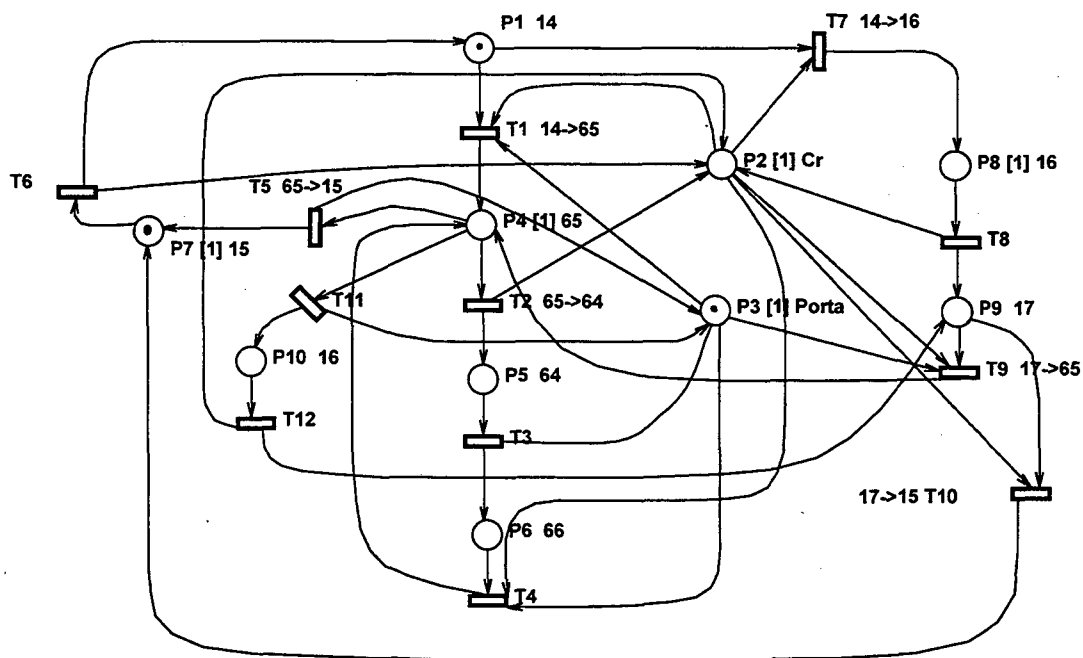


Figura 4.23 - Rede de Petri da Porta Automática I (Ponto de Intersecção 65).

#### Síntese da rede de Petri da figura 4.23:

1. P2 [1] Cr representa o recurso cruzamento. Um AGV passando pelo cruzamento modelado por esta rede, acessa este recurso cruzamento impedindo que outro AGV o faça;
2. P3 [1] Porta representa o recurso porta automática (ponto de intersecção 65 da figura 4.5);

3. Os demais lugares da rede representam os pontos de identificação por onde passam os AGVs;
4. As transições representam os eventos para alocar e liberar os recursos (caminhos dos AGVs);
5. A análise realizada mostra que a rede está livre de bloqueios (“deadlock” na sua estrutura);
6. Cada transição da rede representará um evento no código do programa (codificação), que permitirá implementá-lo de forma correta facilitando a verificação do mesmo;
7. As fichas nos lugares P1 e P7 representam os AGVs nas posições 14 e 15 respectivamente do “layout” da figura 4.5.

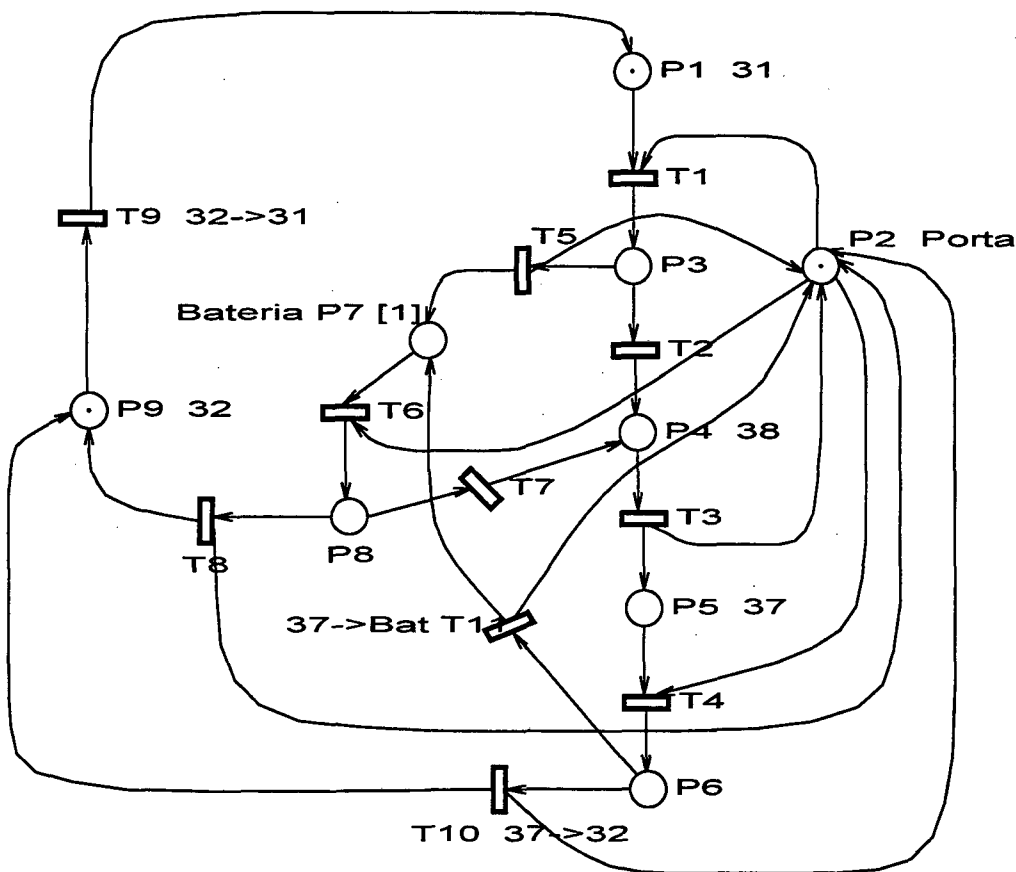


Figura 4.24 - Rede de Petri da Porta Automática II - (Ponto de Intersecção 33)

Síntese da rede de Petri da figura 4.24:

1. P2 representa o recurso porta automática;
2. Bateria P7 [1] representa a estação de carga de bateria dos AGVs;

3. A exemplo da rede de Petri anterior, os outros lugares representam os pontos de identificação dos AGVs nos caminhos e as transições os eventos representando a mudança de posição;

4. As fichas nos lugares P1 e P9 representam os AGVs nas posições 31 e 32 respectivamente do “layout” da figura 4.5;

5. A análise realizada mostra que a rede está livre de bloqueios.

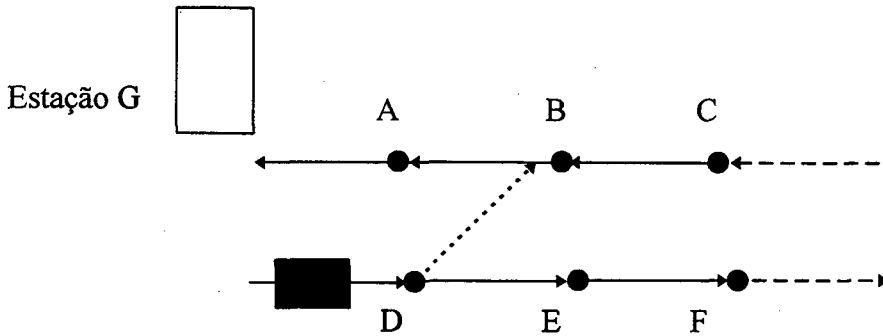


Figura 4.25 - Troca de Pista

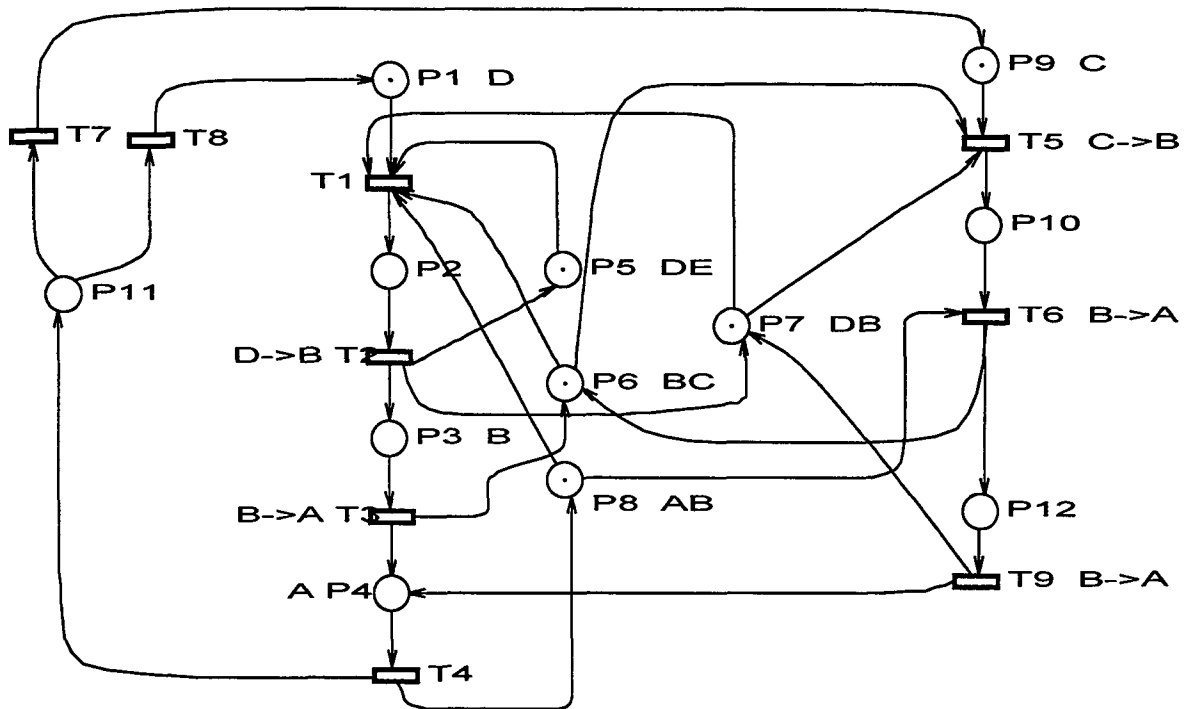


Figura 4.26 - Rede de Petri dos Pontos de Troca de Pista

Síntese da rede de Petri da figura 4.26:

1. Os lugares P1, P3, P4, P9 na rede representam as posições D, B, A e C respectivamente na figura 4.25;

2. As fichas nos lugares P1 e P9 representam dois AGVs nas posições D e C respectivamente;

3. Os lugares P5, P6, P7, P8 representam recursos compartilhados pelos AGVs quando passam por estes pontos, evitando desta forma, colisões entre os veículos. Simplesmente modela a questão de controle de zona;

4. Uma análise da rede, mostra que a mesma está livre de bloqueios;

5. Todas as outras formas de controle de tráfego nos pontos de troca de pista são representados por esta rede de Petri. Na figura 4.5 pode se visualizar os outros pontos onde os AGVs trocam de caminho.

Assim sendo, com este modelo, os pontos críticos onde bloqueios podem acontecer são eliminados nesta fase, facilitando a codificação e verificação do programa além de possibilitar um maior entendimento de toda a lógica de controle de tráfego dos veículos.

### 4.3.3 Coleta de Dados.

A coleta de dados realizada pelos engenheiros da EMBRACO, corresponde a informações essenciais referentes aos elementos do sistema que estão modelados. Estes dados são parâmetros de entrada do modelo, alguns dos quais podem ser ajustados pelo usuário no início da simulação. É importante saber que todas as distâncias no modelo estão em metros e todos os tempos em minutos.

- Informações sobre os AGVs:

. Comprimento:	2.76 metros
. Velocidade média nas retas:	60.0 metros/minuto.
. Velocidade média nas curvas:	30.0 metros/minuto.
. Intervalo entre carga - bateria	60 a 75 minutos.
. Tempo de carga - bateria	4 a 6 minutos.

- Informações sobre todos os caminhos fixos, indicando as distâncias entre todos os pontos de identificação e estações, unidirecionalidade ou bidirecionalidade dos caminhos, a velocidade dos AGVs em cada zona de controle, etc.

- Velocidade das esteiras que alimentam as estações: 5 metros/minuto.
- Dados da produção (taxas de produção de peças).



Os dados da produção de peças representam a grande fonte de aleatoriedade do sistema e, em consequência, também do modelo de simulação.

A preocupação fundamental para análise destes dados é encontrar uma função de distribuição de probabilidade teórica que represente adequadamente os dados reais. Para que possamos acreditar que a distribuição teórica encontrada represente de maneira precisa os dados coletados, testes estatísticos são realizados. O objetivo é testar a hipótese de que o conjunto dos dados observados não difere significativamente do que deveria ser esperado de uma distribuição teórica (hipótese nula  $H_0$ ).

O teste estatístico utilizado neste caso foi o teste de “Kolmogorov-Smirnov” (K-S) pelo motivo da amostra coletada ser pequena. Embora este teste seja apenas aplicado para distribuição contínua, ele pode ser aplicado para pequenas amostras.

O teste (K-S) é conduzido pelo desenvolvimento, especificação e comparação das distribuições de probabilidade acumulada tanto para os dados coletados quanto para os dados esperados (distribuição teórica) [1], [30]. As duas distribuições são divididas em classes, e um desvio absoluto entre as duas distribuições acumuladas para cada classe é calculado. O maior desvio absoluto é o chamado teste (K-S). Este valor deve ser comparado com um valor crítico tabelado. Se o valor de K-S for menor do que o valor crítico então, não podemos rejeitar a hipótese nula “ $H_0$ ” (não há uma diferença significativa entre os dados observados e os dados esperados). Por outro lado, se o valor de K-S for maior que o valor crítico tabelado então a hipótese alternativa “ $H_1$ ” (há uma diferença significativa entre os dados observados e os dados esperados) não poderá ser rejeitada.

As figuras seguintes referenciadas pela tabela 4.1 mostram a análise dos dados coletados. Pelo teste (K-S) comprova-se que a distribuição normal é a que apresenta melhores resultados entre várias distribuições teóricas testadas (exponencial, uniforme, etc.). Para cada figura, o valor do teste K-S é mostrando acima da mesma. Como foram 10 amostras coletadas na simulação, através de uma tabela estatística determinou-se o valor crítico de aceitação como sendo igual a 0.410. Para estes casos, o nível de confiança foi de 95%.

*Dados da Produção Coletados na fábrica.*

Tipo de Peça	Estação Origem	Estação Destino	Pilha	Peças	Figura
Tampa do Cilindro	E3	M3	-	99	4.27
Rotor I	E1	M1	4	48	4.28
Rotor II	E2	M2	4	48	4.29
Bloco I	E9	M9	4	16	4.30
Bloco II	E5	M5	4	16	4.31

Pistão I	E11	M11	-	286	4.32
Pistão II	E12	M12	-	286	4.33
Eixo I	E11	M11	-	117	4.34
Eixo II	E12	M12	-	117	4.35
Placa Válvula	E14	M14_1 e M14_2	-	150	4.36
Solda Tampa I	E16	M16	4	8	4.37
Solda Corpo I	E17	M17	4	8	4.38
Solda Tampa II	E18	M18	4	8	4.39
Solda Corpo II	E19	M19	4	8	4.40
Estator I	E20	M20	-	24	4.41
Estator II	E22	M22	-	24	4.42

Tabela 4.1

A primeira coluna da tabela 4.1 mostra os nomes das peças (componentes para a montagem do compressor).

A segunda e a terceira colunas mostram respectivamente onde os cestos carregados com estas peças devem ser buscados (estação origem) e entregues (estação destino) pelos AGVs.

A quarta coluna mostra o número de cestos que são empilhados verticalmente. Como os cestos sempre são transportados em duas pilhas horizontais, o número total de cestos transportados é igual a duas vezes a pilha vertical.

Na quinta coluna, o número de peças em cada cesto é identificado.

Por fim, a última coluna faz referência a função de distribuição de probabilidade teórica para a taxa de chegada das peças às estações. O eixo horizontal mostra a produção total durante um período de tempo analisado, e o eixo vertical mostra a frequência com que estas produções ocorreram.

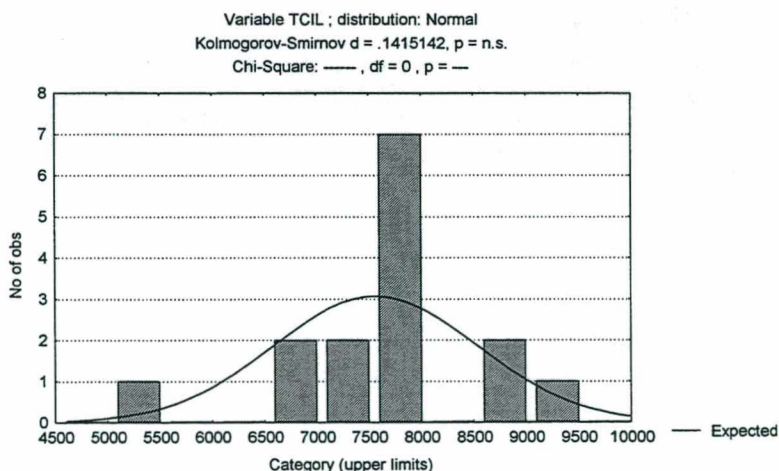


Figura 4.27 - Taxa de Produção do Componente Tampa do Cilindro

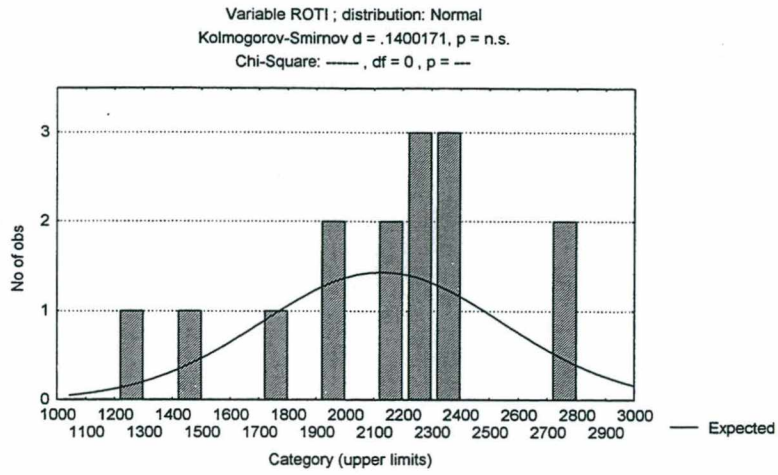


Figura 4.28 - Taxa de Produção do Componente Rotor I

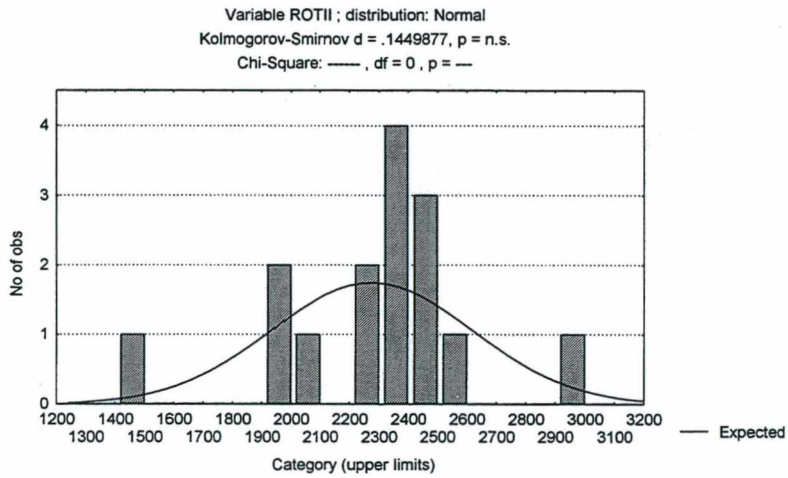


Figura 4.29 - Taxa de Produção do Componente Rotor II

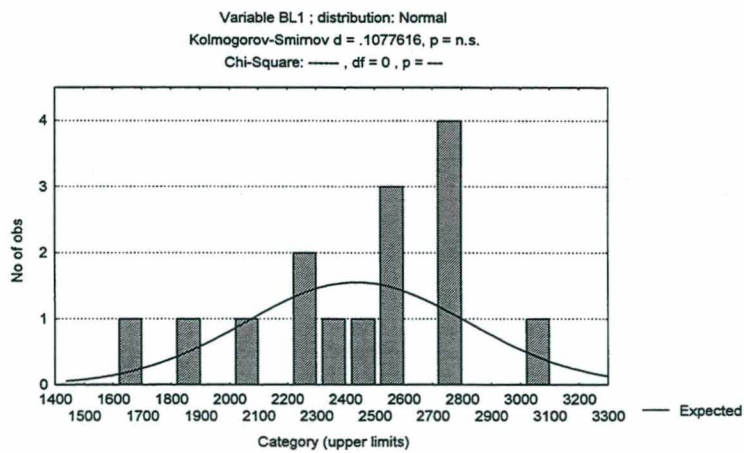


Figura 4.30 - Taxa de Produção do Componente Bloco I

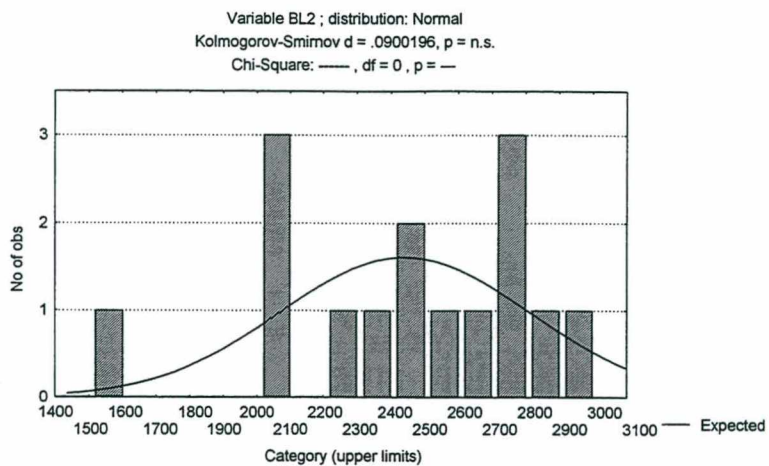


Figura 4.31- Taxa de Produção do Componente Bloco II

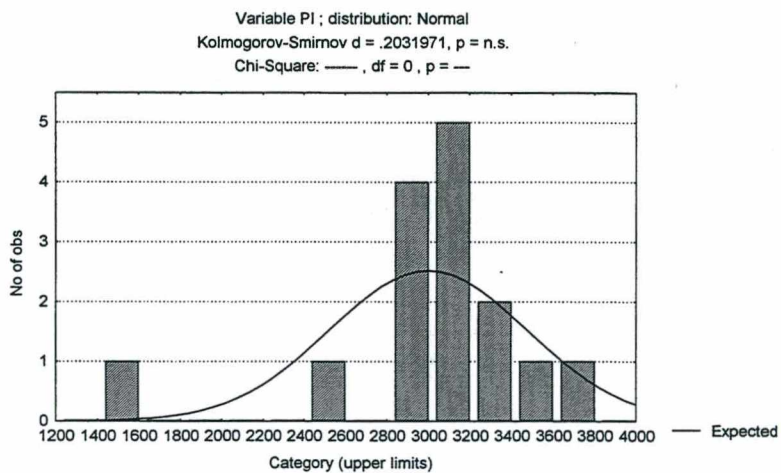


Figura 4.32- Taxa de Produção do Componente Pistão I

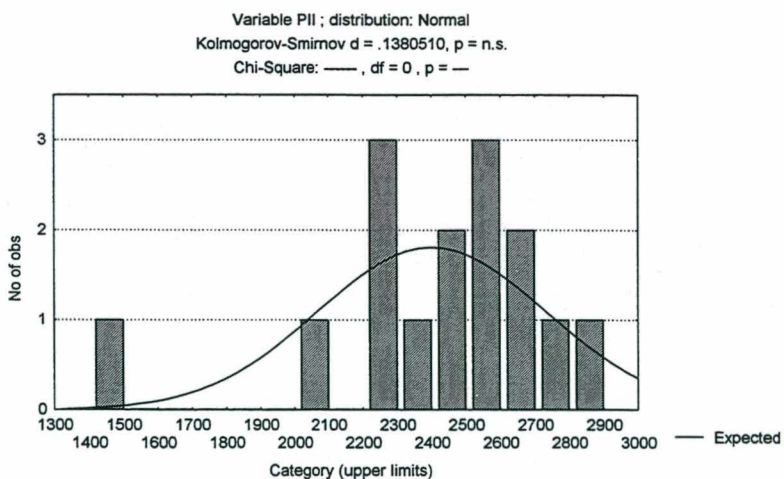


Figura 4.33 - Taxa de Produção do Componente Pistão II

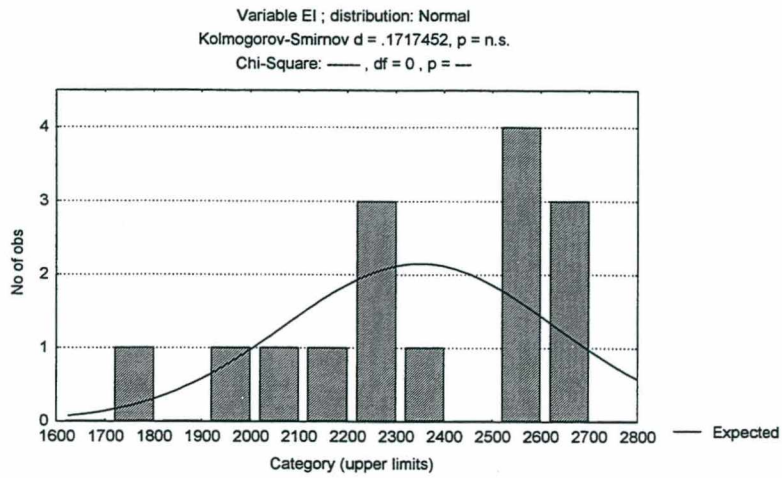


Figura 4.34 - Taxa de Produção do Componente Eixo I

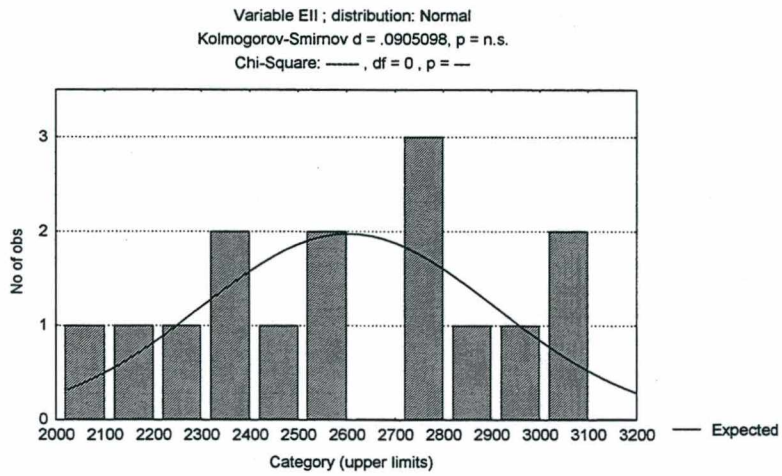


Figura 4.35 - Taxa de Produção do Componente Eixo II

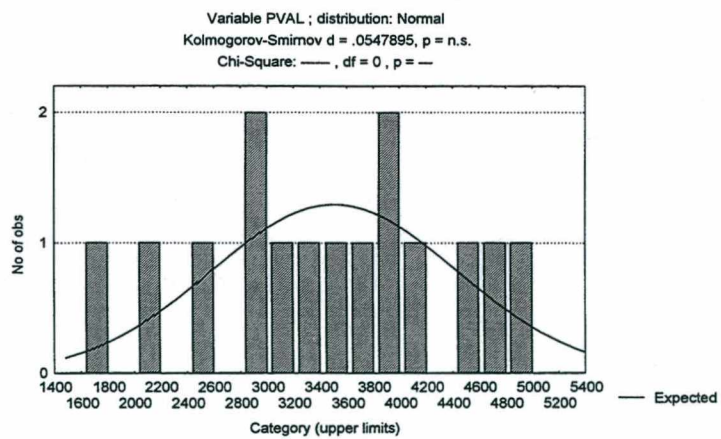


Figura 4.36 - Taxa de Produção do Componente Placa Válvula

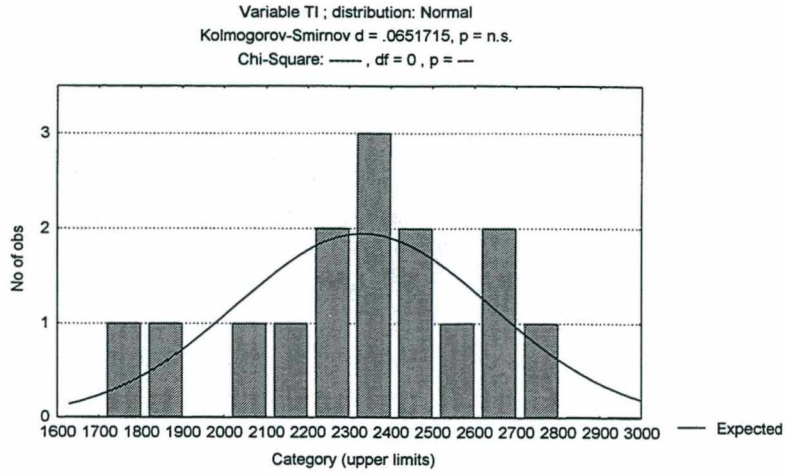


Figura 4.37 - Taxa de Produção do Componente Solda Tampa I

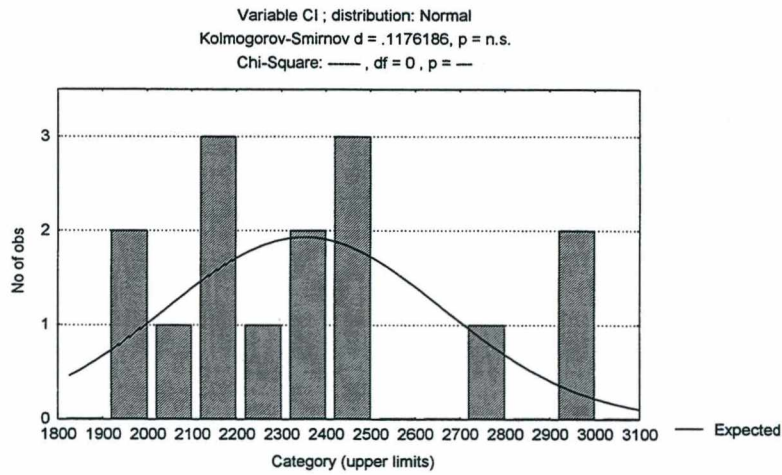


Figura 4.38 - Taxa de Produção do Componente Solda Corpo I

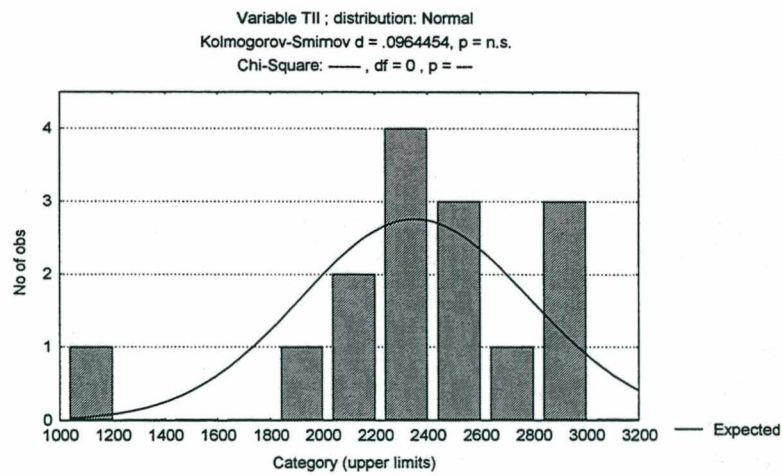


Figura 4.39 - Taxa de Produção do Componente Solda Tampa II

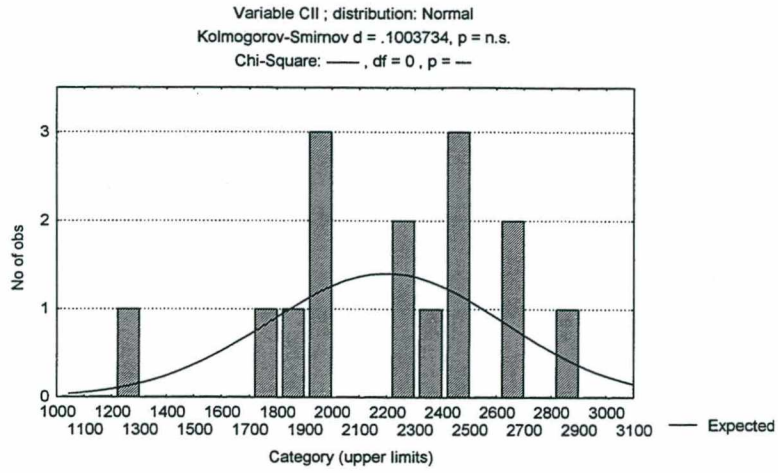


Figura 4.40 - Taxa de Produção do Componente Solda Corpo II

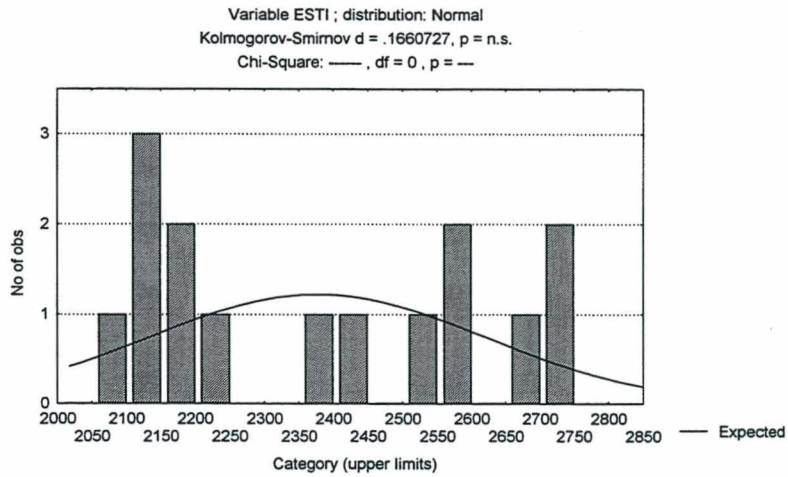


Figura 4.41 - Taxa de Produção do Componente Estator I

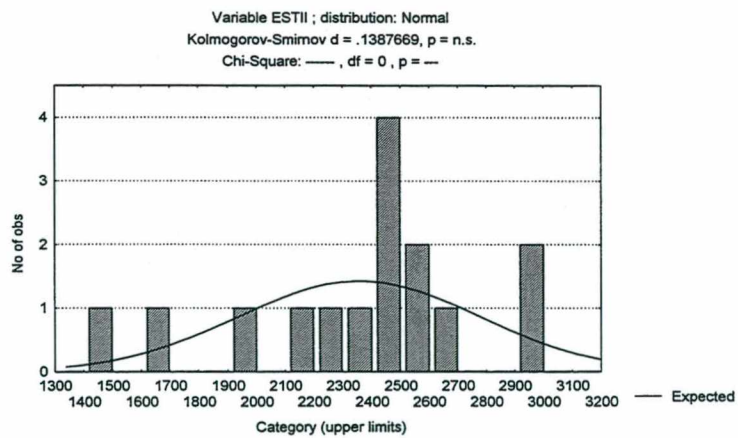


Figura 4.42 - Taxa de Produção do Componente Estator II

#### 4.4 CODIFICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Esta etapa de codificação do modelo de simulação representa a formulação do modelo conceitual desenvolvido na fase anterior em uma linguagem de simulação chamada SIMAN/CINEMA versão 4.0. Para maiores detalhes, ver anexo 1.

##### 4.4.1 Codificação do Modelo Usando o SIMAN.

Um programa em SIMAN que realiza a criação de entidades (chegada de cestos nas estações) é mostrado na figura 4.43.

```

CREATE: 16*(1/(NORMAL(QtyPecas(5)/60,2.27))); Blocos I
ASSIGN: M = StaB1:           Estação de T.Cilindro (2_RB_9)
        TipoCesto = 5:       Cesto carregado com Blocos I
        Destino = 2_RB_9:     Estação de Blocos I
        NEXT(Empilha);       Envia entidade para empilha

CREATE: 150*(1/(NORMAL(QtyPecas(9)/60,5.46))); Peças - P.Válvulas
ASSIGN: M = StaPlacaValvula: Estação de P.Valvulas (3_RB_2B)
        TipoCesto = 9:       Cestos carregado com P.Válvulas
        Destino = 3_RB_2B:    Estação de Placa Válvulas
        NEXT(Empilha);       Envia Entidade para empilha

Empilha QUEUE, TipoCesto,100;           Fila aguardando posição na estação
SCAN: NR(ROrigem(TipoCesto)).EQ.0;      Verifica Estação Carga esta Vazia
QUEUE, TipoCesto+30,10;                 Fila para empilhamento de cestos
COMBINE:CestosEmpilhados(TipoCesto);    Número de Cestos Empilhados
SEIZE: ROrigem(TipoCesto);               Aloca Estação de Carga
QUEUE, TipoCesto+60,1;                  Fila aguardando condições de transp.
SCAN: (OrdemEnviada(TipoCesto).EQ.0).AND.
        (NQ(TipoCesto + 162).LT.2);      Condições de Transporte
ASSIGN: OrdemEnviada(TipoCesto) = 1;     Ordem de Transporte Enviada
DUPLICATE:1,LBUFFER;                     Ordem de Transporte no Buffer
QUEUE, TipoCesto+90,1:DETACH;            Cesto Disponível p/ Transporte - AGV

```

Figura 4.43 - Programa em SIMAN Para Criação de Entidades

Como se realiza o controle dos AGVs ao longo dos caminhos definidos no modelo utilizando o SIMAN?

O movimento dos AGVs dentro do sistema de caminhos depende do tipo de controle do veículo, do tamanho e das características de velocidade do veículo, da direção de viagem em um caminho, do número de zonas que um veículo controla e do grau de congestionamento [1].



Conforme visto na seção 4.2 (figura 4.6), a forma de controle dos AGVs é realizada por zona. Apenas um AGV pode ocupar uma zona em qualquer ponto do tempo. Por exemplo, na figura 4.44, o AGV ocupa a zona A.

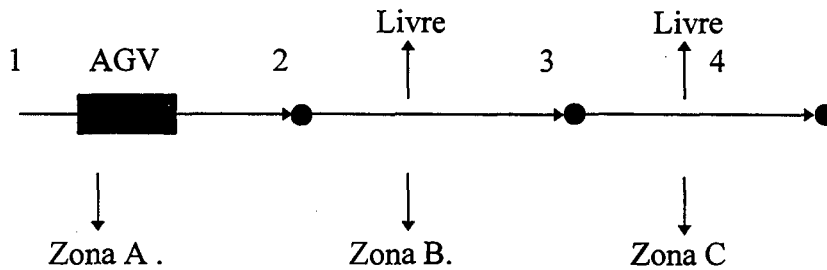


Figura 4.44 - Controle dos AGVs da EMBRACO

Quando o AGV alcançar o ponto 2, verifica-se inicialmente se a zona C está livre (desocupada). Parte-se da suposição que a zona B já esteja livre também. Se estas condições forem verificadas, o AGV passa a ocupar a zona B, liberando a zona A apenas quando alcançar o ponto 3. Ver figura 4.45.

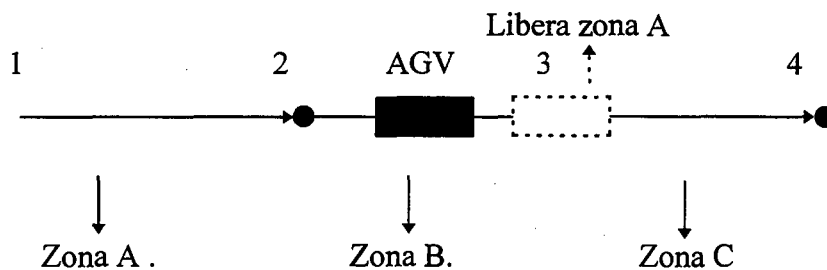


Figura 4.45 - Ocupação e Liberação de Zonas

O controle do AGV é realizado em cada ponto de identificação (intersecção conectando os caminhos). São nestes pontos onde uma decisão é realizada sobre o AGV (segue em movimento ou pára). A figura 4.46 mostra um esquema simplificado do controle realizado no modelo.

```

BRANCH,1:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.2_RB_3),           CarregaRotori:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.3),                 LTX3:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.4),                 LTX4:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.6),                 LTX6:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.7),                 LTX7:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.4_RB_5),           CarrTampal:
  IF, (LT(NumAGV,1).EQ.4_RB_4),           CarrCorpol:
  ELSE,                                     MovAGV;
  
```

Figura 4.46 - Programa em SIMAN do Controle da Posição dos AGVs

A variável  $LT(\text{nome}, \text{unidade})$  é uma variável pré-definida do SIMAN que retorna a posição do AGV em cada instante de tempo. Os parâmetros “nome” e “unidade” identificam o AGV.

Cada entidade que controla um AGV, possui um atributo “numAGV” identificando o número do AGV. Por exemplo, a entidade com “numAGV” = 1, controla o AGV de número 1, e assim sucessivamente. Como no modelo há apenas 4 AGVs, há também 4 entidades que executam esta função de controle, uma para cada AGV.

Quando a entidade que controla o movimento dos AGVs flui por este bloco, um teste é realizado para verificar a sua posição no momento. Por exemplo, na figura 4.46, para o AGV de número 3, se a variável  $LT(3,1)$  retornar o valor 6 significa que o AGV 3 está na posição 6 (ponto de identificação). Na verificação das condições estabelecidas pelo comando “IF” pode-se constatar que o item selecionado é o item 4 com um “label” igual a LTX6. A entidade será enviada para um bloco que possua o “label” igual a LTX6.

Quando um AGV se encontra em uma estação, variável  $LT(\text{numAGV}, 1)$  igual ao número da estação, é realizado um teste que compara a estação que o AGV se encontra com as variáveis indicando o destino da parte da frente e da parte de trás do AGV. Se uma destas variáveis for igual ao número da estação, então um procedimento de carga ou descarga de cestos é modelado, senão, testes para verificar se o AGV pode prosseguir são realizados.

Todo este procedimento embora controle os AGVs ao longo de todos os caminhos, não define qual o caminho que um AGV deve tomar quando viajando de uma estação origem para uma estação destino. Isto acontece porque podem haver vários caminhos conectando as duas estações. Por exemplo, quando um AGV no ponto 14 (figura 4.5) deseja alcançar o ponto 15. Qual o caminho a ser tomado? 14 -> 16 -> 18 -> 17 -> 15; ou 14 -> 65 -> 15. O processador do SIMAN resolve esta questão automaticamente computando e armazenando as distâncias mais curtas entre todas as intersecções (pontos de identificação, decisão e estações). Para este exemplo que constitui uma parte da rede de caminhos fixos do sistema EMBRACO, a parte da matriz que corresponde a este setor é mostrada na figura 4.47. É importante saber que a rede de caminhos fixos é formada por todos as intersecções do sistema, identificando as distâncias entre todos os pontos. A figura 4.47 apenas exemplifica como o SIMAN armazena os valores na matriz. A unidade de distância é o centímetro.

A matriz da figura 4.47 fornece a distância para os caminhos mais curtos entre duas intersecções no sistema. Entretanto, esta matriz não identifica o caminho a ser tomado. Esta informação é fornecida pela matriz da figura 4.48. Esta matriz indica qual a próxima intersecção a ser acessada sobre o caminho mais curto baseado na posição corrente e no destino do AGV. No exemplo, a entrada na linha 1 (intersecção 14) e coluna 2 (intersecção 15) vê-se que a próxima intersecção no caminho do AGV é a intersecção 65. Uma vez na intersecção 65, a entrada na linha 6 (intersecção 65) e coluna 2, mostra que a próxima intersecção é a 15 que corresponde ao destino final do AGV.

	14	15	16	17	18	65
14	0000	2717	1364	2904	2304	1717
15	3833	0000	5197	6737	6137	5600
16	3508	2530	0000	1540	940	4133
17	1968	990	2190	0000	3130	2593
18	2568	1590	2790	600	0000	3193
65	4328	950	820	2360	1760	0000

Figura 4.47 - Matriz de Distância mais Curta entre as Estações

	14	15	16	17	18	65
14	14	65	16	16	16	65
15	11	15	11	11	11	11
16	18	18	16	18	18	18
17	14	15	15	17	15	65
18	17	17	17	17	18	17
65	16	15	16	16	16	65

Figura 4.48 - Matriz de Identificação do Caminho

Estas duas matrizes são criadas automaticamente e são usadas sempre que um veículo está se movendo e quando uma decisão baseada no critério de distância mais curta é realizada [1].

Com este mecanismo foi possível otimizar dois caminhos do sistema de transporte da EMBRACO. As figuras 4.49 e 4.50 mostram os antigos e os novos caminhos dos AGVs em dois pontos diferentes da fábrica.

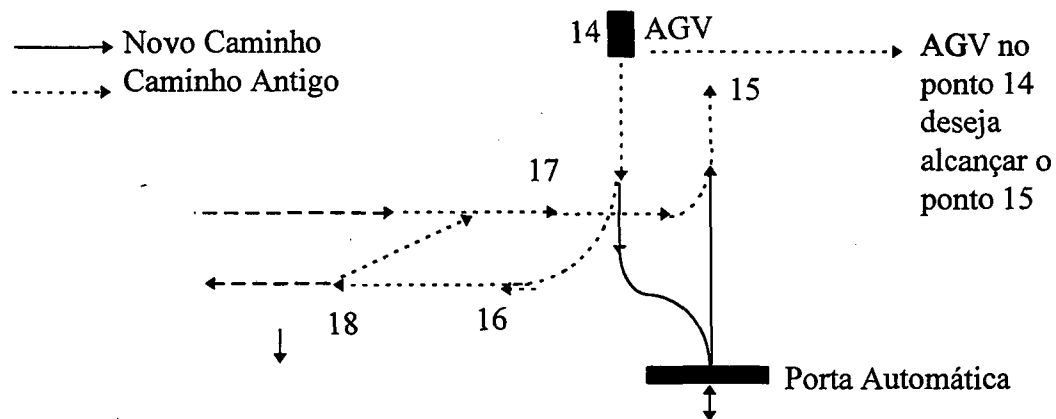


Figura 4.49 - Novo Caminho Através da Porta Automática

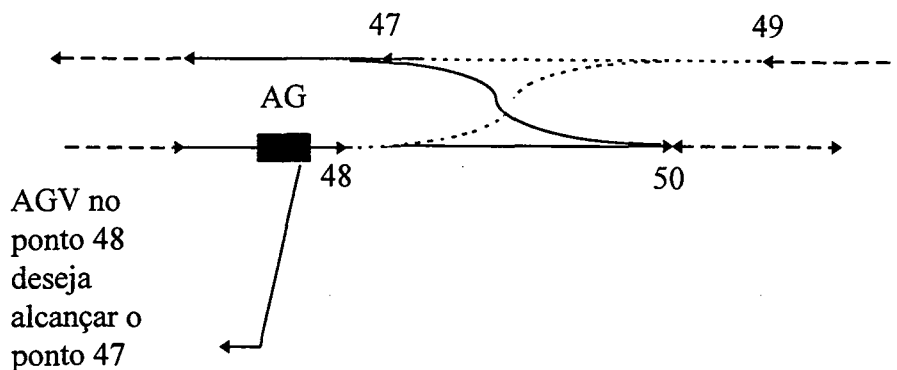


Figura 4.50 - Otimização do Cruzamento

Com esta possibilidade de otimização, novos caminhos foram alterados no sistema EMBRACO, diminuindo o tempo de viagem dos veículos.

#### 4.5 DESENVOLVIMENTO DAS ETAPAS

##### **Definição do Problema e Objetivos:**

Toda a fase de definição do problema e objetivos a serem alcançados foi realizada na EMBRACO em um período de 20 dias intercalados. Participaram, engenheiros da EMBRACO, parte da administração da empresa e engenheiros da empresa “Eisenmann”.

A maior dificuldade nesta fase foi a questão da descrição exata da política de escalonamento, solucionada com o projeto já em andamento.

##### **Modelo Conceitual e Coleta de dados:**

A fase da construção do modelo conceitual e coleta de dados foi desenvolvida parte na empresa (coleta de dados) e parte no laboratório da UFSC (modelo conceitual) em um período de aproximadamente 10 dias. A principal dificuldade desta fase foi a obtenção de dados confiáveis e o entendimento completo dos caminhos dos AGVs. O modelo conceitual foi reformulado algumas vezes devido a alterações do sistema real.

##### **Codificação do Modelo:**

A fase de codificação do modelo de simulação foi toda realizada em laboratório da UFSC durante um período de 4 meses. Grande parte deste tempo envolveu também a verificação do modelo.

Alterações do sistema real durante o período de codificação fez com que houvesse a necessidade de se alterar o código do modelo. Isto foi resultado da reformulação do modelo conceitual.

#### 4.6 CONCLUSÃO

Este capítulo procurou descrever todo o sistema de transporte da EMBRACO (AGVs) abordando apenas os aspectos mais importantes do sistema e destacando as informações fundamentais para o entendimento de todo o problema.

Conhecido o problema e os objetivos a serem alcançados, todo o processo de modelagem foi desenvolvido obtendo como um resultado final, um modelo de simulação do sistema de transporte da EMBRACO. Este modelo ainda não representa o sistema em estudo. É fundamental que as etapas de verificação e validação do modelo sejam realizadas afim de que tenhamos um modelo fidedigno. Estas etapas estão colocadas no capítulo seguinte.

# CAPÍTULO 5: VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO DOS AGVs

---

## 5.1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior descreveu a metodologia do projeto de simulação dos AGVs até a fase de codificação do modelo. Embora seja possível executar o modelo e coletar resultados de saída após o término da simulação, não se pode garantir que os resultados obtidos estejam corretos. Desta forma, dando continuidade a metodologia descrita no capítulo 2, o capítulo 5 descreve o mecanismo de verificação e validação do modelo.

## 5.2 VERIFICAÇÃO DO MODELO

O objetivo do processo de verificação do modelo de simulação dos AGVs é determinar se o modelo construído opera como desejado.

Todo o processo de verificação está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento do modelo conceitual e à formulação na linguagem SIMAN. A medida que o modelo foi sendo codificado, a tarefa de verificação foi sendo realizada paralelamente, analisando, encontrando e corrigindo os erros por parte, facilitando a depuração do programa. Após o modelo completamente codificado, uma verificação final foi realizada como forma de garantir que todas as partes, em conjunto, funcionam adequadamente, sem erros na estrutura do modelo. Para atingir este objetivo, três procedimentos foram adotados, conforme descritos no capítulo 2:

### (a) Traço.

O SIMAN possui um comando que permite a execução do modelo passo a passo, listando todos os eventos e estados do modelo através do fluxo das entidades pelos blocos. Este procedimento possibilita ao projetista determinar precisamente o movimento das entidades dentro do modelo e ainda obter um resumo de todas as ações executadas quando uma entidade passa por um determinado bloco. É importante saber que o SIMAN movimenta uma entidade por vez, embora o modelo possa conter várias entidades. Este

movimento da entidade para quando a entidade encontra, por exemplo, um bloco “delay” simulando uma atividade.

Para permitir ao usuário acompanhar a simulação de forma mais detalhada, o SIMAN possui uma série de comandos facilitando a depuração do modelo. Ver anexo 1.

O código abaixo mostra a execução do modelo passo a passo para a criação de entidades (chegada de cestos a uma estação de carga). Os valores numéricos no canto esquerdo representam o tempo da simulação.

```
TIME: 0.0 ENTITY: 62

* 126      CREATE:
           16*(1/(NORMAL(QtyPecas(4)/60,0.77)));
           MARK(TimeIn);

0.0>step
 126      CREATE
           TIMEIN set to 0.0
           Next creation scheduled at time 3.05176

* 127      ASSIGN:
           M=StaB2:
           TipoCesto=4:
           Destino=2_RB_6:
           NEXT(Empilha);

0.0>step
 127      ASSIGN
           M set to 5
           TIPOCESTO set to 4.0
           DESTINO set to 74.0

* 274 Empilha  QUEUE, TipoCesto, 100;

0.0>show nq(4)
nq(4) = 1.000
```

Figura 5.1 - Execução do Modelo Passo a Passo

### (b) Animação do Processo.

A animação do processo de transporte mostrando as interações ocorrendo com todos os elementos do sistema facilitou a verificação do modelo. A animação foi de fundamental importância principalmente para acompanhar o movimento dos AGVs ao longo dos caminhos possibilitando um maior entendimento de todo o processo.

### (c) Verificação Realizada por Pessoas Externas.

A incorporação de dúvidas externas com conhecimentos a respeito do sistema real (engenheiros da EMBRACO), acompanhada pela animação da simulação, possibilitou corrigir erros na lógica da programação, principalmente os erros vinculados à política de escalonamento.

Outros itens como, ajustes de unidades, variáveis, atributos das entidades, funções de distribuição também foram analisados. As questões referentes a bloqueios no sistema foram eliminadas com o desenvolvimento do modelo conceitual via rede de Petri facilitando a verificação do código implementado.

## 5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO.

A etapa de validação do modelo de simulação dos AGVs teve a finalidade de avaliar afirmações sobre os valores estimados pela simulação. É importante compreender que, em razão da variabilidade inerente à amostragem aleatória (execução do modelo de simulação), as estatísticas amostrais (resultados das simulações) tendem a aproximar, ao invés de igualar, os parâmetros da população (dados observados do sistema real). Isto deve ser considerado na análise para estimar um parâmetro populacional a partir de parâmetros amostrais. O que se deseja analisar é se as variações entre os resultados da simulação e as observações realizadas na fábrica são casuais ou são devidas a outros fatores como, por exemplo, pouca fidedignidade do modelo em relação ao sistema, necessitando neste caso, a inclusão de detalhes anteriormente desconsiderados.

O modelo de simulação dos AGVs foi validado utilizando-se três procedimentos básicos:

### (a) Testes sobre o comportamento do modelo.

Para o modelo ser validado, o modelo deve apresentar um comportamento semelhante ao do sistema real. Para este caso, realizou-se uma sequência de testes que, na verdade, também fazem parte do processo de verificação do modelo de simulação.

- **Continuidade:** Os parâmetros de entrada do modelo (taxas de produção) sofreram pequenas alterações com o objetivo de se avaliar as modificações ocorridas nos resultados de saída. Nestes testes verificou-se que, quando diferentes simulações foram executadas com pequenas variações nos dados do modelo, pequenas variações nos resultados de saída ocorreram como esperado. Estas observações, decorrentes das características do modelo, não forçou diferentes tomadas de decisão em relação ao funcionamento do sistema, por



exemplo, alteração do número de AGVs devido à pequenas variações nas taxas de produção.

- Outros testes realizados como: Os testes de consistência do modelo onde alguns componentes do sistema foram retirados como forma de refletir estas alterações nos resultados de saída do modelo. Para este caso, dois AGVs foram retirados do sistema de transporte, o AGV número 1 que atende o setor de usinagem e o AGV número 4 que atende o setor de soldagem. Como esperado, houve uma maior utilização dos AGVs 2 e 3 e também observou-se um maior acúmulo de cestos nas estações de carga. Além disso, toda a aleatoriedade da produção foi retirada, substituindo a função de distribuição de probabilidade pelo parâmetro constante da função (valor médio). Este teste foi realizado com o objetivo de verificar a consistência da política de escalonamento, ou seja, para uma mesma taxa de produção, é provável que o número de cestos cheios acumulados nas estações da produção tenham valores próximos, isso porque, de acordo com o que foi implementado, a política de escalonamento deve atender todas as estações de maneira igual, sem priorizar uma ou outra estação, a não ser pela sequência das ordens de transporte colocadas no "buffer" do CLP central. É importante lembrar que a alteração da função de distribuição pelo seu parâmetro constante foi útil apenas para retirar a aleatoriedade da produção e com isso poder analisar melhor o comportamento do modelo.

#### **(b) Testes sobre a estrutura do modelo.**

Para realizar os testes sobre a estrutura do modelo, observações do modelo de simulação através da animação foram realizadas, possibilitando acompanhar todos os movimentos dos veículos, validando principalmente questões referentes a política de escalonamento implementada. Todo este acompanhamento foi realizado em conjunto com os engenheiros da EMBRACO.

Para facilitar a validação, uma análise detalhada do modelo conceitual foi realizado mostrando o mapeamento entre o modelo construído e a realidade, quais os detalhes considerados e desconsiderados no modelo. Esta validação foi realizada antes mesmo de codificar o modelo no SIMAN.

#### **(c) Testes Estatísticos.**

Por fim, para finalizar a etapa de validação, testes de significância, permitindo avaliar estatisticamente os resultados de saída do modelo, foram realizados. Estes testes foram executados com auxílio de um "software" estatístico, "STATISTIC" em conjunto com o SIMAN.

O primeiro passo para testar a significância dos resultados da simulação foi a formulação de duas hipóteses:

- Hipótese nula -  $H_0$ : Os resultados da simulação são condizentes com os resultados observados do sistema real.
- Hipótese alternativa -  $H_1$ : Os resultados da simulação não são condizentes com a realidade, ou seja, é maior ou menor do que o valor alegado.

Se após uma análise, a decisão é aceitar  $H_0$ , a implicação é que a discrepância entre os resultados do modelo e os dados observados do sistema real é mais provavelmente devida a variações casuais. Por outro lado, a decisão de rejeitar  $H_0$  implica que as variações dos resultados do modelo em relação ao sistema real são grandes para serem devidas apenas ao acaso. Neste caso, a estrutura do modelo, os parâmetros de entrada, etc. devem ser revistos com o propósito de alcançar um modelo que represente fielmente o sistema em análise.

O teste de significância realizado foi o teste de duas amostras para médias [15]. A finalidade deste teste é decidir se as médias de duas populações são iguais, exigindo-se duas amostras independentes, uma para cada população.

Por decisão dos engenheiros da empresa, a análise deveria ser realizada sobre o tempo que os cestos cheios aguardam por transporte nas estações de carga, mais precisamente, sobre o intervalo de tempo que os cestos (2 pilhas horizontais) estão disponíveis nas estações de carga até a chegada de um AGV para transportar os cestos aí colocados, independentemente do momento em que foi gerada a ordem de transporte. A geração de uma ordem de transporte depende de outros fatores além da disponibilidade de cestos nas estações de carga conforme já analisado. Conforme a figura 5.2, no instante de tempo “ $t_1$ ” 2 pilhas horizontais de cestos estão disponíveis na estação. Devido as condições, apenas em “ $t_2$ ” uma ordem de transporte é gerada e colocada no “buffer”. Os cestos permanecem na estação até o instante “ $t_3$ ” quando um AGV se posiciona para carregar os cestos aí colocados.

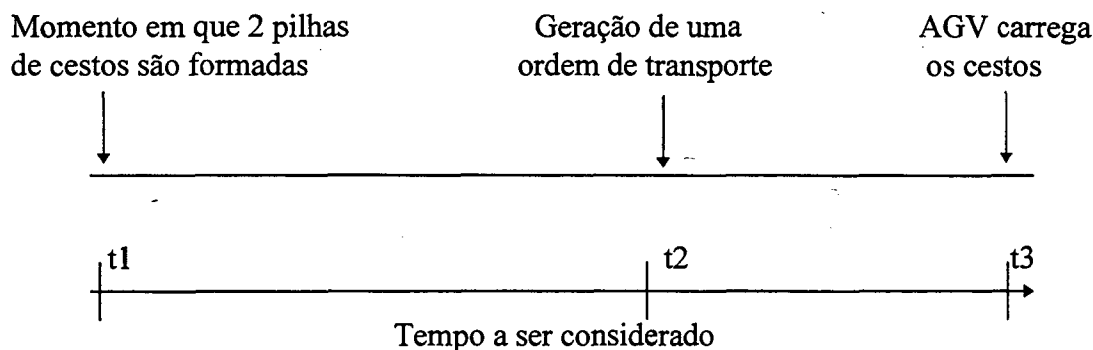


Figura 5.2 - Tempo de Espera nas Estações para Transporte

Para selecionar as amostras, escolheu-se 20 valores representativos dos dados coletados na fábrica (amostra da população 1) durante dois turnos de produção. Para cada componente (peça), calculou-se o valor esperado e a variância do tempo de espera dos

cestos nas estações. Para realizar o processo de comparação, foram executadas 10 simulações com o objetivo de gerar um conjunto de 10 resultados (amostra da população 2). Em cada simulação, o valor médio e a variância dos tempos de espera dos cestos também foram coletados.

Para executar as simulações, utilizou-se como dados de entrada do modelo a produção dos dois turnos em que foram realizadas as coletas de dados. A produção total para estes dois turnos analisados foram:

LINHA	TURNO 1	TURNO 2
Bloco I	2989	2692
Bloco II	2914	2562
Eixo I	Inoperante	1850
Eixo II	2168	2680
Montagem I	2260	2340
Montagem II	2605	2620
Placa Válvula	5100	3460
Rotor I	2260	2580
Rotor II	2560	2600
Solda Corpo I	2730	2010
Solda Corpo II	2720	2230
Solda Tampa I	3101	2296
Solda Tampa II	2738	2600
Tampa do Cilindro	6039	7920

Tabela 5.1

Estes resultados foram utilizados como parâmetros de entrada do modelo (taxa de produção horária para cada tipo de peça). Lembrando que a função que modela a taxa de chegada das peças é uma função normal. Assim, para todos os casos considerou-se uma variância igual a 0.01 devido aos poucos dados coletados.

Não foram realizadas observações para os componentes “Estator I” e “Estator II” em virtude do transporte destes componentes não estão sendo realizada por AGVs.

Estatisticamente, a hipótese nula  $H_0$  afirma que as duas populações possuem a mesma média. Isso significa que os resultados da simulação representam, com determinado nível de confiabilidade, os resultados do sistema real. A hipótese alternativa  $H_1$  afirma que as duas populações possuem médias diferentes, e os resultados do modelo não são confiáveis. Admitindo-se ambas populações normalmente distribuídas e sabendo-se que a soma do tamanho das amostra ( $n_1 + n_2$ ) é igual 30 e, portanto estatística a ser calculada é o valor de “t”. (“student”) [30].

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{[(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2]}{(n_1 + n_2 - 2)} \times \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Onde “xi”, “si” e “ni” representam respectivamente a média, a variância e o tamanho da amostra “i” (i = 1,2). Este valor de “t” é comparado com um valor de “t crítico” tabelado representando a linha divisória entre o que se pode chamar de variação casual e variação não casual. Ver figura 5.3.

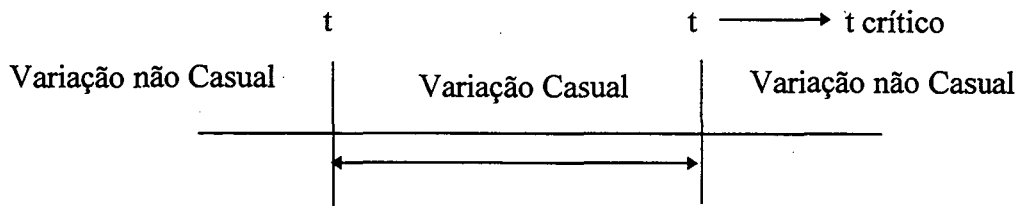


Figura 5.3 - Variação Casual x Variação Não Casual

Para um nível de significância de 5%, a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira é de apenas 5%, o valor de “t” crítico com n1 + n2 - 2 graus de liberdade é igual a 2.048. Para encontrar este valor é necessário apenas pesquisar a tabela “t”, com a área de 0.025 pelo fato do teste ser bilateral.

Se o valor de “t” encontrado estiver dentro da área limitada pelo valor de “t” crítico, então não podemos rejeitar a hipótese nula H0, ou seja, admitimos esta hipótese como sendo verdadeira. Caso contrário, se o valor de “t” encontrado for maior ou menor que o valor de “t” crítico, então a hipótese nula não é verdadeira. Neste caso, estamos rejeitando a hipótese do modelo estar validado. Ver figura 5.4.

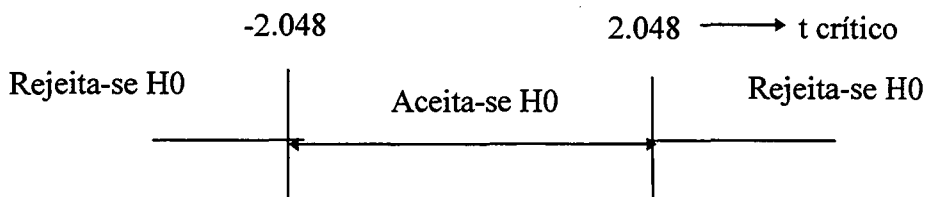


Figura 5.4 - Limites Críticos de t

Muito embora possamos aceitar ou rejeitar uma hipótese, é importante saber que erros do tipo I e do tipo II podem estar sendo cometidos, ver [30]. Cometemos um erro do tipo I se rejeitamos a hipótese nula H0 quando ela é verdadeira. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é igual ao nível de significância estabelecido. Portanto, para o modelo de simulação dos AGVs, a probabilidade de se cometer este tipo de erro é de apenas 5% conforme especificado. Por outro lado, cometemos um erro do tipo II se

aceitamos a hipótese nula  $H_0$  como sendo verdadeira quando ela é falsa, ou seja, nós assumimos que os resultados do modelo são condizentes com a realidade quando na verdade não são. Neste caso, estamos assumindo que as variações observadas entre os resultados do modelo e os dados do sistema real são casuais quando na verdade são variações representativas. Este tipo de erro pode levar a resultados desastrosos, tendo em vista que estamos assumindo, erroneamente, o modelo como sendo validado, isto é, representando adequadamente o comportamento do sistema real.

O tamanho deste tipo de erro depende de quão falsa seja  $H_0$  [30]. Se  $H_0$  é ligeiramente falsa, a probabilidade de cometer um erro do tipo II será muito maior do que quando  $H_0$  é muito falsa (o verdadeiro valor e o valor suposto são muito diferentes). Ver figura 5.5

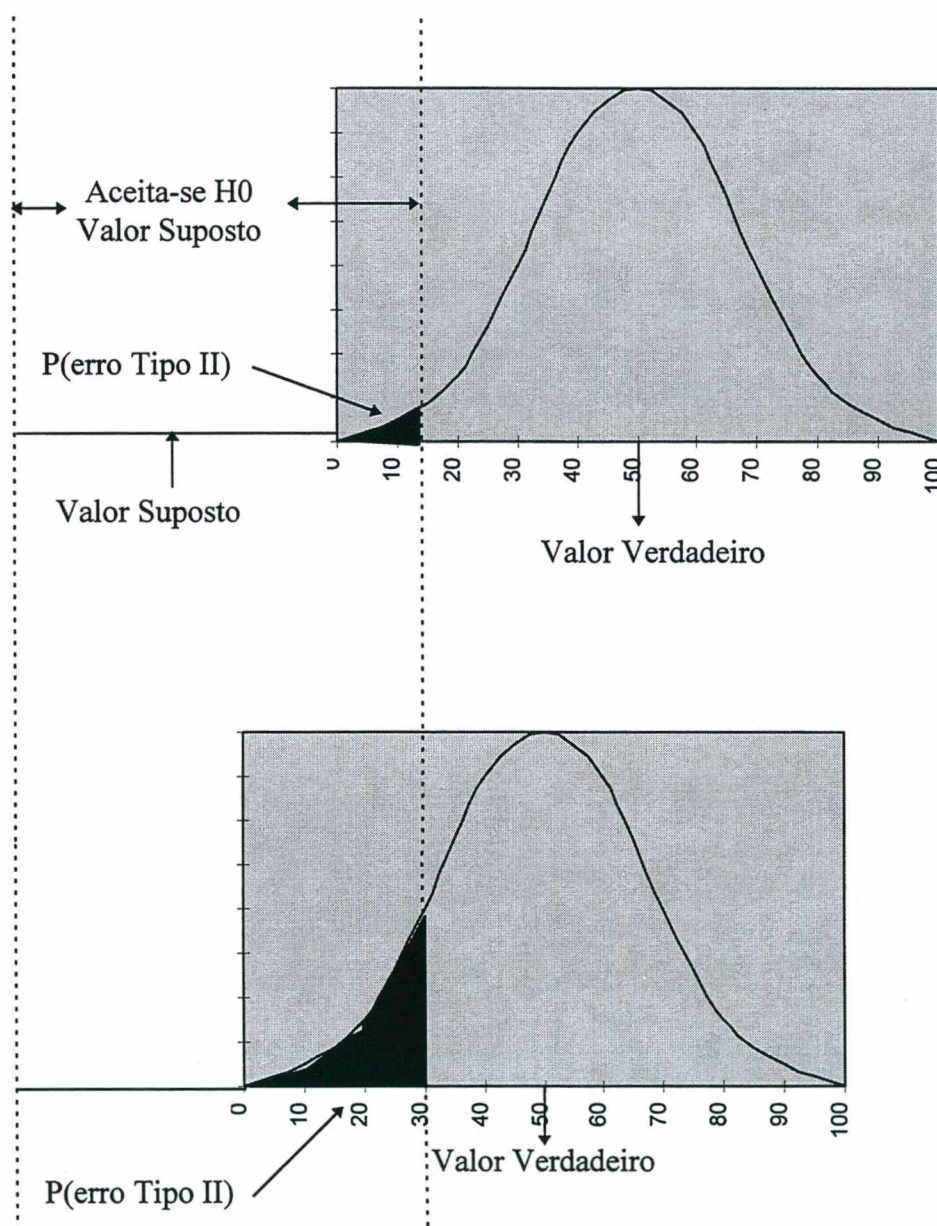


Figura 5.5 - Tamanho do Erro do Tipo II

Assim, quanto mais próxima estiver o valor suposto do valor verdadeiro, maior será a probabilidade de se cometer um erro do tipo II.

Para o cálculo deste tipo de erro, devemos assumir um valor verdadeiro, pois para cada valor verdadeiro encontrado, uma probabilidade diferente de cometer o erro do tipo II também será encontrada. Assim, assumimos inicialmente que as observações realizadas no sistema real são representativas do comportamento do mesmo e assumimos com sendo valores verdadeiros.

A tabela 5.2 mostra os resultados de algumas amostras. As médias e variâncias da variável “tempo que os cestos esperam por um AGV na estação”, tanto do sistema real quanto da simulação, foram comparadas para verificar o grau de proximidade entre os resultados do modelo e do sistema. Este valor de proximidade é estabelecido pelo valor do erro do tipo II.

Componentes	Média e Variância do Sistema Real (minutos)		Média e Variância dos resultados da Simulação (minutos)		Valor do "t" e Probabilidade de erro tipo II	
Solda Tampa I	3.8	4.37900	4.58	0.91092	-1.1147	99.5
Solda Tampa II	2.3	2.83157	1.92123	0.96125	0.645	90.0
Solda Corpo II	4.3	5.16842	4.2	0.72470	0.1335	95.0
Pistão/Eixo I	5.8	39.7330	5.41	1.00000	0.1928	95.0
Pistão/Eixo II	5.7	33.3400	3.13	0.50000	1.3896	95.0
Placa Válvula	4.4	6.71100	4.57	0.21693	-0.204	95.0
Bloco I	6.57	36.7017	7.623	0.09029	-0.5398	95.0

Tabela 5.2

É visível que todos os valores de t encontrados estão dentro da área limitada por “t” crítico. Portanto, a hipótese nula  $H_0$  é aceita, ou seja, os resultados fornecidos pela simulação são condizentes com os dados do sistema real.

Para outros tipos de componentes como: “Rotores” e “Tampa do Cilindro”, as análises não foram realizadas por falta de dados (poucas observações no sistema real). Para os componentes “Bloco II” e “Corpo I”, os valores de “t” críticos foram, respectivamente, -3.83 e 3.27. Portanto para estes componentes, a hipótese nula foi rejeitada. O motivo principal desta rejeição está na influência de uma série de aleatoriedades sobre o sistema real que não foram incluídas no modelo como, por exemplo, a influência humana na retirada de cestos das estações das linhas de montagem podendo provocar atrasos na geração de ordens de transportes, etc.

É de interesse que novas coletas sejam realizadas, preferencialmente que os dados sejam mais significativos e representativos do sistema. Assumimos apenas como hipótese de que os dados coletados na fábrica são representativos do comportamento do sistema.

A maior dificuldade da implementação desta fase foi a coleta de dados na fábrica para realizar a comparação do modelo com o sistema real. Estas observações podem não estar representando adequadamente o comportamento do sistema devido a uma série de fatores aleatórios como já citado. Para realizar uma coleta de dados mais segura é necessário que o sistema adquira seu regime permanente de produção e é também necessário o treinamento de pessoal para realizar a coleta de dados. Esta tarefa é custosa do ponto de vista econômico e de tempo, cabendo aos engenheiros da empresa decidirem realizar ou não estas observações em um futuro próximo.

## 5.4 DESENVOLVIMENTO DAS ETAPAS

### Verificação do Modelo:

Conforme já escrito, a fase de verificação do modelo esteve bastante relacionada com a fase de codificação, sendo ambas realizadas paralelamente. A duração total destas duas fases foi de 4 meses. A grande dificuldade da fase de verificação do modelo foi a realização de testes para cada estação de carga e descarga de cestos para analisar o comportamento dos AGVs. Este procedimento para testes foi responsável por, no mínimo, 50% de todo o tempo de projeto.

### Validação do Modelo:

A fase de validação do modelo de simulação foi dividida em duas partes. Primeiro, a validação do modelo conceitual representando todo o procedimento para transporte de cestos realizado pelos AGVs. Segundo, a validação do modelo codificado e verificado. Toda esta fase apresentou uma duração média de 30 dias. Neste período, um grande número de simulações foi realizado e, tanto o comportamento do modelo via animação quanto os resultados fornecidos no fim de cada simulação foram analisados e comparados com o sistema real.

## 5.5 CONCLUSÃO

Como conclusão a respeito da validação do modelo de simulação, os resultados, em geral, se mostraram muito bons, em virtude de toda a aleatoriedade do processo que pode provocar grandes variações em todos os resultados.

As duas fases descritas neste capítulo, verificação e validação, finalizam a segunda etapa do projeto. Portanto, com o modelo construído, verificado e validado, experimentos podem ser conduzidos e os objetivos citados podem ser alcançados. Os procedimentos de testes e análise dos resultados estão no próximo capítulo.



# CAPÍTULO 6: EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

---

## 6.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é descrever a última etapa do projeto de simulação do sistema de AGVs da EMBRACO, a produção de "corridas" (execuções) e análise dos resultados de saída do modelo. Validado, o modelo de simulação dos AGVs é uma representação do sistema real dentro de determinado nível de confiança, possibilitando a execução de experimentos sob certas condições de interesse do usuário. Estas condições estão colocadas na seção 6.2, referenciando à entrada de dados do modelo. Para uma análise correta dos resultados produzidos no fim da simulação, há a necessidade de um entendimento completo do significado de cada valor estimado. A seção 6.3 tem este objetivo de dar uma interpretação para cada resultado obtido na simulação usando o SIMAN. A seção 6.4 descreve todo o procedimento de execução do modelo, obtenção e análise dos resultados fornecidos pela simulação. Por fim, a seção 6.5 mostra como esta etapa foi executada.

## 6.2 DADOS DE ENTRADA DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para colher resultados de um experimento de simulação, o usuário deve propor que tipos de testes devem ser executados, quais as situações de interesse que devem ser analisadas. Isto caracteriza um projeto experimental realizado antes do início da execução do modelo.

O modelo de simulação do sistema de AGVs permite que o projetista ou usuário estabeleça os dados (parâmetros de entrada) de interesse com o objetivo de avaliar o sistema de acordo com as condições estabelecidas.

A entrada de dados principal do modelo está representada na figura 6.1. Na primeira opção "PRODUÇÃO", o usuário pode selecionar as condições de produção para cada tipo de peça, conforme mostra a figura 6.2. Ao selecionar, por exemplo, a opção número 1 do menu II, "ROTOR I" (peça para a linha de montagem I), o usuário poderá especificar, a taxa de produção das células de manufatura e o número de cestos que serão transportados pelos AGVs a cada ordem de transporte gerada. Ver figura 6.3. Isto

possibilita verificar se o sistema de transporte atende a um determinado nível de produção (X peças/hora).

----- PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO -----  
-----

- MENU I DE OPÇÕES --- :
- 1. PRODUÇÃO
  - 2. AGVs
  - 3. INICIA SIMULAÇÃO
  - 4. TEMPO DE SIMULAÇÃO
- SELECIONE UMA OPÇÃO :

Figura 6.1 - Menu I de Opções

--- MENU II DE OPÇÕES --- :

- 1. ROTOR I
  - 2. ROTOR II
  - 3. TAMPA DO CILINDRO
  - 4. BLOCO I
  - 5. BLOCO II
  - 6. COMPONENTES
  - 7. EIXO I
  - 8. EIXO II
  - 9. PISTÃO I
  - 10. PISTÃO II
  - 11. PLACA VÁLVULA I
  - 12. PLACA VÁLVULA II
  - 13. SOLDA TAMPA I
  - 14. SOLDA TAMPA II
  - 15. SOLDA CORPO I
  - 16. SOLDA CORPO II
  - 17. ESTATOR I
  - 18. ESTATOR II
  - 19. RETORNO AO MENU I
- SELECIONE UMA OPÇÃO :

Figura 6.2 - Menu II de Opções

```
----- ROTOR I -----  
-----  
--- 1. PRODUÇÃO (PECAS/HORA)  
--- 2. NÚMERO DE CESTOS EM TRANSPORTE  
--- 3. RETORNO
```

Figura 6.3 - Menu III de Opções

A opção 2 do menu principal (figura 6.1), permite ao usuário selecionar o número de AGVs dentro do modelo. Ver figura 6.4.

Especifique o Número de AGVs no Modelo:

```
==== 4 AGVs : 5 AGVs : 6 AGVs: ====
```

Figura 6.4 - Menu IV de Opções

O usuário pode selecionar de 4 a 6 AGVs. Como o sistema já possui 4 AGVs com alocação fixada, apenas na opção de 5 ou 6 AGVs o usuário poderá selecionar onde deseja que o AGV trabalhe, no setor de soldagem ou no setor de usinagem. Ver figura 6.5.

AGV Número 5 Atendendo:

1. Soldagem (Corpo e Tampa)
2. Usinagem / Rotores

Figura 6.5 - Menu V de Opções

Por fim, de volta à figura 6.1 o usuário pode selecionar o tempo que deseja simular (em minutos), e iniciar a simulação.

Se o usuário não especificar nenhuma opção de produção, o modelo assume os valores "default" colocados no experimento do modelo. Na opção "AGVs", o valor "default" é 4, conforme o sistema real e na opção "TEMPO DE SIMULAÇÃO", o valor "default" é de 10.000 minutos (6.9 dias de produção aproximadamente). Os valores "default" da produção horária e do número de cestos transportados estão na tabela 6.1.

**Importante:** Na tabela 6.1, 8 cestos por exemplo, representam duas posições da estação de carga ocupadas (cestos em fila) sendo que em cada posição há uma pilha vertical de 4 cestos; 2 cestos significa que as duas posições da estação de carga estão ocupadas mas não há empilhamento vertical.

Componentes	Produção horária	Custos em transporte
Rotor I	400	8
Rotot II	400	8
Tampa do Cilindro	800	2
Bloco I	400	8
Bloco II	400	8
Eixo I	400	2
Eixo II	400	2
Pistão I	400	2
Pistão II	400	2
Placa Válvula I	400	2
Placa Válvula II	400	2
Solda Tampa I	400	8
Solda Corpo I	400	8
Solda Tampa II	400	8
Solda Corpo II	400	8
Estator I	400	8
Estator II	400	8

Tabela 6.1

### 6.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS USANDO O SIMAN.

No fim de cada simulação, o SIMAN fornece um relatório mostrando os resultados estatísticos colhidos durante a execução do modelo. Estes resultados devem ser avaliados apenas quando uma das metodologias descritas no capítulo 2 forem aplicadas (sistemas terminais ou não terminais). Se este procedimento não for adotado, conclusões errôneas podem ser tomadas a respeito dos resultados fornecidos pelo relatório que representa, na verdade, uma entre muitas e possíveis saídas do modelo (aleatoriedade). Mas o importante nesta seção é descrever o que significa cada item estatístico visualizado no relatório final do SIMAN. O procedimento de análise será realizado na seção seguinte.

As informações contidas no relatório são categorizadas por tipo: O primeiro tipo refere-se a "TALLY VARIABLES", registrando o tempo que uma entidade flui de uma parte a outra do modelo. Por exemplo, o registro do tempo que uma entidade permaneceu no modelo, desde a sua criação (chegada) até a sua destruição (saída do modelo).

A estrutura do "TALLY VARIABLES", com um exemplo, é a seguinte:

*TALLY VARIABLES*

Identifier	Average	Variation	Minimum	Maximum	Observations
Tempo I	10.500	0.0350	.00000	20	50
Tempo II	13.248	0.0589	.00000	35	40

Tabela 6.2

• O primeiro item "Identifier" identifica a variável cujas informações serão registradas. Tempo I, pode representar o tempo que a peça do tipo I permaneceu no sistema e, Tempo II, representando o mesmo tempo, mas para peça do tipo II. Estas variáveis são registradas em um bloco específico do SIMAN conhecido como "TALLY". Além de registrar o tempo no modelo, o "TALLY" pode registrar outros tempos, como por exemplo, o tempo que uma peça gasta em uma determinada estação, etc. Para analisar os outros itens, suponhamos que a informação a ser registrada é o tempo gasto no sistema.

• O segundo item "Average" é o tempo médio que uma peça gastou para percorrer todo o sistema.

• O Terceiro item "Variation" é o desvio padrão das observações dividido pela média fornecendo uma variação em torno do valor médio. Este valor é conhecido como coeficiente de variação. Assim, como o coeficiente de variação indica o desvio padrão em relação a média, um valor zero no item "Variation" indica que não houve qualquer variação do dados observados. Já, para um grande valor de "Variation" há uma indicação que houve uma grande variação das observações coletadas em torno da média.

• Os itens "Minimum", "Maximum" e "Observations" registram respectivamente, os tempos mínimo e máximo que a peça gastou no sistema, e o número de observações registradas, ou seja, o número de peças que fluíram pelo sistema no tempo de simulação considerado.

O segundo tipo refere-se a "DISCRETE CHANGE VARIABLES", ou variáveis discretas no tempo, registrando a utilização de um recurso, estoques e comprimento das filas. Este tipo possui a seguinte estrutura:

*DISCRETE CHANGE VARIABLES*

Identifier	Average	Variation	Minimum	Maximum	Final Value
Fila 1	1.238	0.5000	.00000	2	0.0000
Máquina 1	87.690	0.3450	.00000	100	1.00000

Tabela 6.3

A interpretação é semelhante ao primeiro tipo. Entretanto, no caso da média e do coeficiente de variação, o valor é ponderado pelo intervalo de tempo pelo qual o valor persistiu. Por exemplo, suponhamos que o comprimento da fila foi de 2 unidades durante um tempo de 10 unidades de tempo (ut), 0 durante 5 ut's e apenas 1 durante 6 ut's . O comprimento médio da fila neste caso é:

$$\frac{2*10 + 0*5 + 1*6}{21} = 1.238 \text{ peças}$$

Na última coluna, o item "Final Value" registra a informação do momento que a simulação terminou.

Ainda na tabela 6.3, o exemplo mostra que a máquina 1 apresentou um percentual de utilização de 87.690% com uma variação de 0.3450. O valor final igual a 1 significa que a máquina estava ocupada quando a simulação terminou.

O terceiro tipo refere-se aos contadores "COUNTERS" que registram o número de entidades que fluem pelo bloco "COUNT" na estrutura do modelo.

A estrutura é a seguinte:

#### *COUNTERS*

Identifier	Count	Limite
Número de Peças	20	Infinite

Tabela 6.4

- O item "Count" registra o número de entidades (peças) que fluiu pelo bloco "COUNT" "Número de Peças" do modelo.

- O item "Limite" é utilizado para indicar que o contador possui um limite. Quando este valor limite é alcançado, a simulação termina.

Há outros tipos de registros como os registros feitos para as variáveis contínuas. Para maiores detalhes ver [1].

## **6.4 EXECUÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DOS AGVs.**

O sistema de transporte da EMBRACO pode ser caracterizado como um sistema não terminal, tendo em vista não haver um evento natural definindo o fim da produção e/ou condições iniciais fixadas para as quais o sistema retorna.

Como o principal objetivo é verificar se o sistema atende a um determinado nível de produção, condições iniciais foram estabelecidas pelos engenheiros da EMBRACO. A entrada de dados para o modelo está na tabela 6.5, mostrando a taxa de produção horária para cada componente e o número total de cestos que são transportados, lembrando que os mesmos são transportados em pilhas.

O experimento de simulação foi executado com 4 AGVs, os AGVs de número 1 e 3 atendendo ao setor de usinagem e os AGVs de número 2 e 4 atendendo ao setor de soldagem. Estas condições são os valores “default” estabelecidos.

Tipo de Peças	Produção Horária	Número de Cestos para Transportes
Rotor I	400	8
Rotor II	400	8
Tampa do Cilindro	800	2
Bloco I	400	8
Bloco II	400	8
Componentes	Transporte não realizado por AGVs	-
Eixo I	400	2
Eixo II	400	2
Pistão I	400	2
Pistão II	400	2
Placa Válvula	800	2
Solda Tampa I	400	8
Solda Corpo I	400	8
Solda Tampa II	400	8
Solda Corpo II	400	8
Estator I e Estator II	Transporte não realizado por AGVs	-

Tabela 6.5

A metodologia aplicada para estudar sistemas não terminais foi então adotada. Esta metodologia, descrita no capítulo 2, apresentou os seguintes passos:

1. Assumiu-se inicialmente que o sistema é não terminal.

2. Uma simulação piloto foi executada com um tempo de 1000 minutos (16.67 horas), com o objetivo de definir o período de "warmup" da simulação. Todas as observações registradas neste período foram desconsideradas.

3. No arquivo experimento do SIMAN, definiu-se um elemento chamado "TALLIES: tempo no Sistema", registrando o tempo que cada entidade (cesto) gastou no modelo. Estes valores foram armazenados em um arquivo de saída "tempo.dat". Observação: "tempo no sistema" é o intervalo de tempo que um cesto entra na estação ou na esteira transportadora que conecta a célula de fabricação à estação de carga até o momento em que o cesto volta da linha de montagem para a estação de cestos vazios na produção.

4. O comando "MovAverage" do processador de saída do SIMAN possibilitou suavizar o gráfico do arquivo "tempo.dat" registrando os tempos no sistema para as entidades. Visualmente, selecionou-se o tempo de truncamento da simulação definindo o período de "warmup". O gráfico da figura 6.6 mostra que o ponto de truncamento é aproximadamente 200 minutos. Com isso, todas as observações no regime transitório foram descartadas, considerando-se apenas as informações em regime permanente.

5. Definido o período de "warmup" da simulação, o comando "FILTERS" do processador de saída do SIMAN foi utilizado para filtrar (preparar) os resultados para análise excluindo o período de "warmup". Todos os dados filtrados foram armazenados em um arquivo "tempo.fil". Este arquivo contém as observações tratadas (filtradas) e todas as análises foram realizadas sobre este arquivo e não mais sobre o arquivo "tempo.dat" que contém dados não tratados estatisticamente.

Inicialmente, cada grupo foi constituído por apenas uma única observação. Os resultados obtidos foram:

TEMPO INICIAL TRUNCADO:	200 minutos
NÚMERO DE OBSERVAÇÕES POR GRUPO:	1 observação
NÚMERO DE GRUPOS FORMADOS:	3973 grupos
COVARIÂNCIA ENTRE OS GRUPOS:	0.7584

6. Após a filtragem dos dados, um correlograma foi gerado do novo arquivo de dados "tempo.fil" com o objetivo de verificar a correlação ou dependência das observações coletadas. Este correlograma é mostrado na figura 6.7. O correlograma foi utilizado para determinar o número de observações para qual a correlação é igual a zero. Pode-se constatar que para um número de observações (cestos) igual a 69, a correlação é praticamente nula.

Os resultados do correlograma foram:

MÉDIA AMOSTRAL:	49.32 minutos
VARIÂNCIA AMOSTRAL:	398.40 minutos
TAMANHO DA AMOSTRA:	3973
NÚMERO DE OBSERVAÇÕES = 69:	CORRELAÇÃO = 0.0008



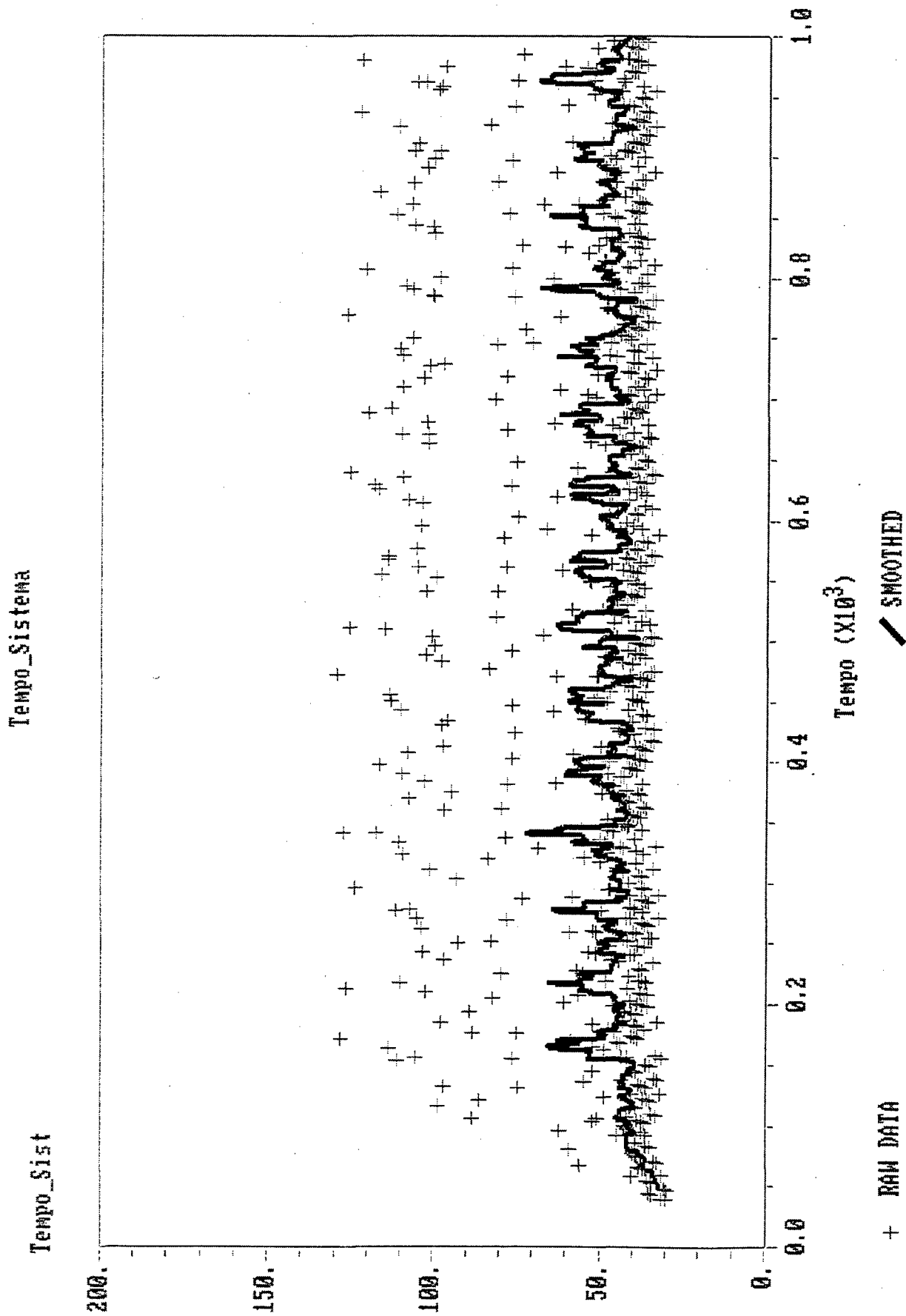


Figura 6.6 - Suavização do Gráfico - Tempo no Sistema.

7. Selecionou-se o tamanho dos grupos igual a 10 vezes o número de observações para o qual a correlação é aproximadamente nula, ou seja,  $10 \times 69 = 690$ . Cada grupo formado, portanto, conteve 690 observações.

O número de grupos formados foi igual a 20, representando 20 amostras coletadas. Outros testes com um menor número de grupos poderiam também ser analisados, diminuindo assim, o tempo de simulação.

8. Executou-se a simulação novamente com o objetivo de gerar o tempo que os cestos gastam no sistema. Um intervalo de confiança aceitável sobre as médias de cada grupo foi gerado pelo processador de saída do SIMAN. Ver figura 6.8. Sabendo-se que em média, a cada 0.21 minutos, uma observação (chegada de uma entidade) é realizada, o tempo final de simulação foi definido como:

**Tempo de Simulação =**

"warmup" + (20grupos)x(690 observações/grupo)x(0.21 minutos/observação) =

200 + 20x690x0.21 = 3098 minutos. Selecionou-se um tempo de 3100 minutos (2.15 dias de produção).

9. Gerou-se um relatório final contendo as principais estatísticas. Ver figura 6.9.

#### **6.4.1 Interpretando os Resultados da Simulação.**

O relatório final da simulação começa com um conjunto de informações do tipo "TALLY VARIABLES" registrando o tempo para cada variável de interesse.

O primeiro item no "Identifier" é "Tempo\_Tampa\_Cilindro". Este primeiro item especifica informações estatísticas (média, variação, etc.) sobre o tempo que os cestos na estação E3 aguardam por um AGV. Este tempo é cronometrado no momento que a ordem de transporte é gerada e colocada no "buffer" até o momento que o AGV chega na estação E3 e carrega os cestos aí colocados. Esta interpretação é semelhante para os demais itens do relatório.

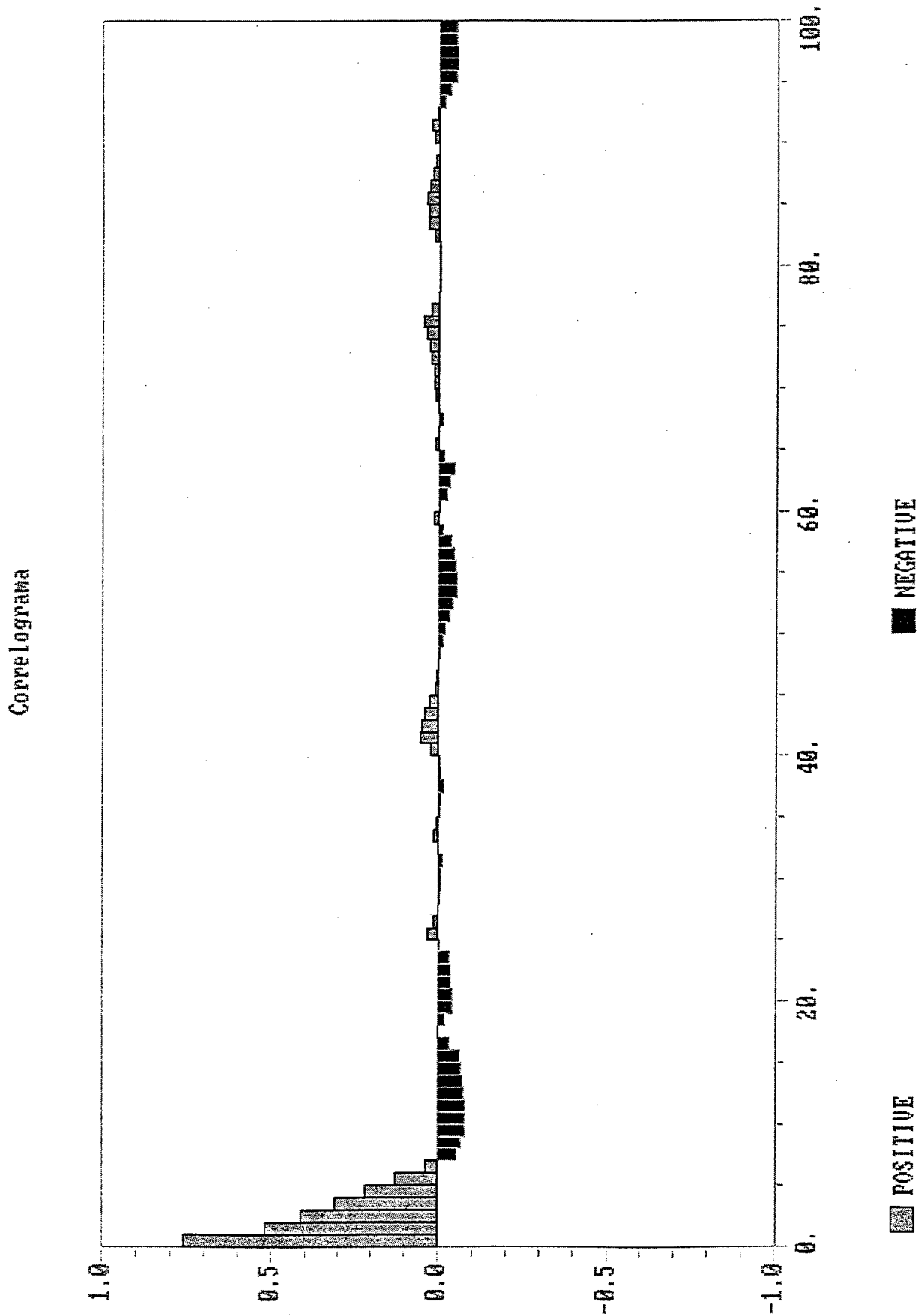


Figura 6.7 - Correlograma da Observações

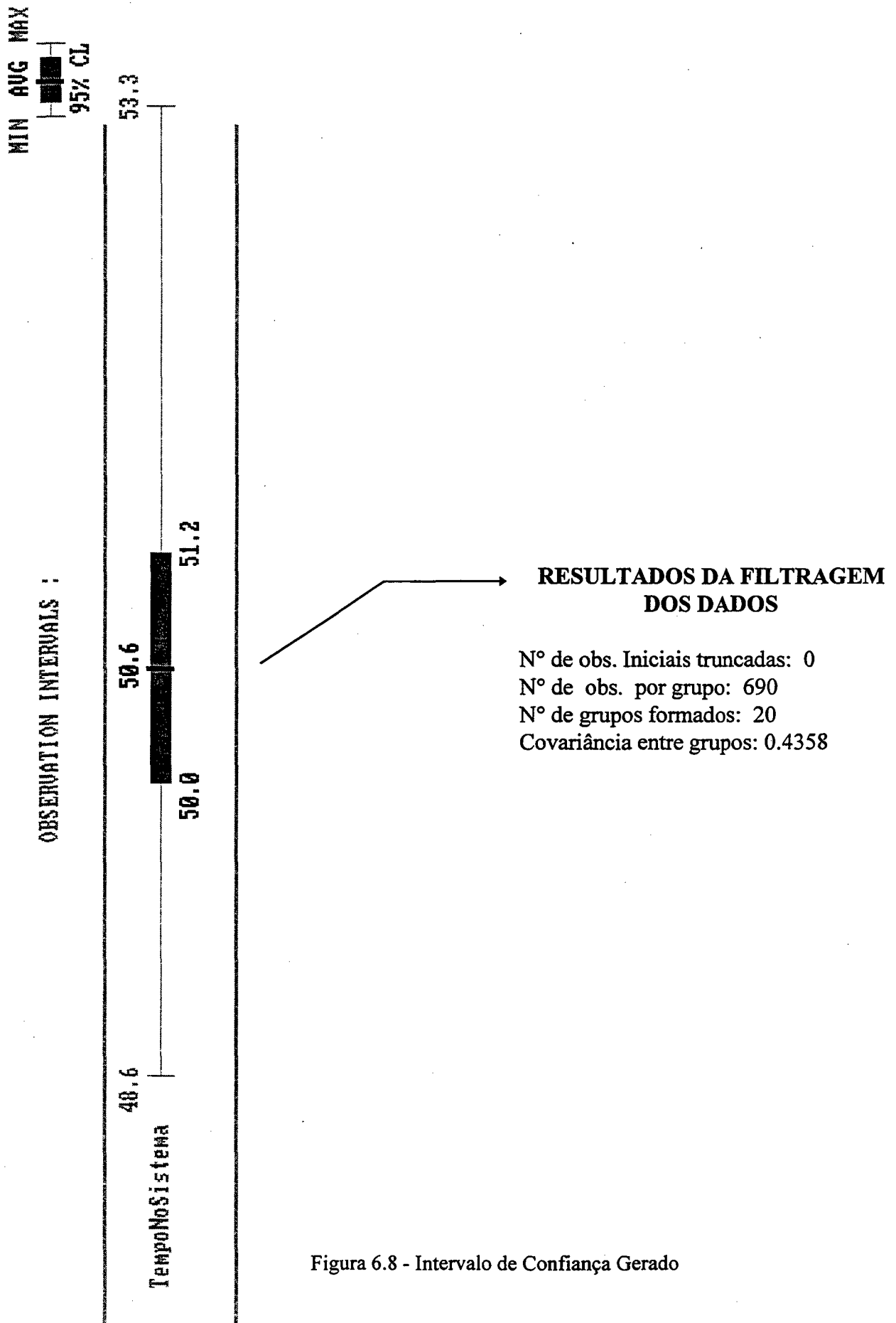


Figura 6.8 - Intervalo de Confiança Gerado

## DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA - METROS

AGV 1 COM 1 ORDEM:	21662.8
AGV 1 COM 2 ORDENS:	64892.7
AGV 2 COM 1 ORDEM:	30162.5
AGV 2 COM 2 ORDENS:	52879.4
AGV 3 COM 1 ORDEM:	22332.6
AGV 3 COM 2 ORDENS:	65541.9
AGV 4 COM 1 ORDEM:	30537.2
AGV 4 COM 2 ORDENS:	52856.3

SIMAN IV - License #9310660

Univ. Federal De Santa Catarina

Summary for Replication 1 of 1

Project: AGVS\_EMBRACO                      Run execution date:                      1/10/1997  
Analyst: Carlos Fernando Martins              Model revision date:                      4/30/1996

Replication ended at time:                      3100.0  
Statistics were cleared at time:                      200.0  
Statistics accumulated for time:                      2900.0

## TALLY VARIABLES

Identifier	Average	Variation	Minimum	Maximum	Observations
Tempo_Tampa_Cilindro	5.9902	.46188	.69727	13.545	196
Tempo_RotorI	5.8908	.44194	1.6658	11.068	50
Tempo_RotorII	8.6454	.33758	3.8452	16.132	50
Tempo_BlocosII	4.6241	.50287	.68140	12.071	151
Tempo_BlocosI	5.7031	.61777	.17090	19.632	151
Tempo_Componentes	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_E_PistaoI	5.6572	.64953	.32828	19.566	117
Tempo_E_PistaoII	3.4374	.92470	.11304	14.608	117
Tempo_P_Valvulas	5.8026	.49645	2.3400	19.859	129
Tempo_TampaI	2.3830	.61820	.17358	7.3612	302
Tempo_CorpoI	2.1686	.64448	.19629	7.7216	302
Tempo_TampaII	1.4128	1.0241	.01660	6.6106	302
Tempo_CorpoII	1.0690	1.0340	.00195	6.9041	302
T_CestoVazio_TampaI	6.1606	.61019	.01840	17.404	302
T_CestoVazio_TampaII	4.8727	.48371	.01855	13.893	302
T_CestoVazio_CorpoII	5.5754	.39601	.14441	14.828	302
T_CestoVazio_CorpoI	6.3580	.41182	.02368	15.903	301
T_CestoVazio_RotorI	4.8799	.56390	.47571	14.924	51
T_CestoVazio_RotorII	4.4203	.32836	1.0486	8.4983	50
T_CestoVazio_Tcil	4.7244	.58266	.78003	13.043	97

T_CestoVazio_P_ValII	4.6293	.54198	.14563	12.021	64
T_CestoVazio_P_ValI	4.9717	.67619	.26807	15.700	65
T_CestoVazioEixo_PII	4.0916	.66216	.30457	14.417	116
T_CestoVazioEixo_PI	5.0951	.59239	.32910	14.715	116
T_CestoVazio_BlocoI	3.9546	.61173	.71918	12.490	151
T_CestoVazio_BlocoII	5.0039	.55888	.20059	13.427	151
Tempo_EstatorI	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_EstatorII	-----	-----	-----	-----	0
T_CestoVazio_EstatorI	-----	-----	-----	-----	0
T_CestoVazio_EstatorII	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_Ordem_Buffer	3.5242	.80141	.12207E-03	18.722	4236
Tempo_TCil_Vazia	1.0697	.78054	.14978	1.8597	5
Tempo_RotI_Vazia	.80444	.68334	.30420	1.5642	5
Tempo_RotII_Vazia	1.1884	.26297	.96741	1.4094	2
Tempo_BlocII_Vazia	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_BlocI_Vazia	2.0277	.40164	1.0984	2.6171	3
Tempo_Comp_Vazia	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_EPistI_Vazia	.01343	6.9352	.00000	.74951	67
Tempo_EPistII_Vazia	.11643	6.6832	.00000	6.3010	67
Tempo_PValI_Vazia	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_TampaIVazia	.56758	.98232	.07751	1.3655	4
Tempo_CorpoIVazia	2.2051	.37109	1.6265	2.7837	2
Tempo_TampaIIVazia	.28236	.57196	.04364	.46381	7
Tempo_CorpoIIVazia	.81130	1.6554	.01428	3.1790	5
Tempo_EstatIVazia	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_EstatIIVazia	-----	-----	-----	-----	0
Tempo_PValIIVazia	2.2893	.00000	2.2893	2.2893	1
TempoNoSistema	50.656	.39655	31.839	137.36	14386

DISCRETE-CHANGE VARIABLES

Identifier	Average	Variation	Minimum	Maximum	Final Value
AGV 1 Movel%	84.686	.42524	.00000	100.00	100.00
AGV 1 Parado%	8.4642	3.2885	.00000	100.00	.00000
AGV 1 Carga.Bat%	6.8495	3.6878	.00000	100.00	.00000
AGV 1 Com 1 Ordem%	20.863	1.9476	.00000	100.00	.00000
AGV 1 Com 2 Ordem%	60.583	.80662	.00000	100.00	100.00
AGV1 1 Ordem 0 Cesto%	6.6180	3.7564	.00000	100.00	.00000
AGV1 2 Ordens 0 Cesto%	5.6534	4.0852	.00000	100.00	.00000
AGV1 1 Ordem 1 Cesto%	14.245	2.4536	.00000	100.00	.00000
AGV1 2 Ordens 1 Cesto%	25.541	1.7074	.00000	100.00	100.00
AGV1 2 Ordens 2 Cesto%	29.388	1.5501	.00000	100.00	.00000
Tempo AGV1 Bloq.Min	.07204	.65910	.00000	.15009	.15009
AGV 2 Movel%	82.003	.46847	.00000	100.00	100.00
AGV 2 Parado%	10.955	2.8510	.00000	100.00	.00000

AGV 2 Carga.Bat%	7.0414	3.6334	.00000	100.00	.00000
AGV 2 Com 1 Ordem%	28.126	1.5986	.00000	100.00	100.00
AGV 2 Com 2 Ordem%	50.054	.99891	.00000	100.00	.00000
AGV2 1 Ordem 0 Cesto%	4.7561	4.4750	.00000	100.00	.00000
AGV2 2 Ordens 0 Cesto%	2.2174	6.6406	.00000	100.00	.00000
AGV2 1 Ordem 1 Cesto%	23.370	1.8108	.00000	100.00	100.00
AGV2 2 Ordens 1 Cesto%	15.289	2.3539	.00000	100.00	.00000
AGV2 2 Ordens 2 Cesto%	32.548	1.4396	.00000	100.00	.00000
Tempo AGV2 Bloq.Min	.02060	1.1361	.00000	.04919	.04919
AGV 3 Movel%	85.718	.40818	.00000	100.00	.00000
AGV 3 Parado%	7.5288	3.5046	.00000	100.00	100.00
AGV 3 Carga.Bat%	6.7529	3.7160	.00000	100.00	.00000
AGV 3 Com 1 Ordem%	21.667	1.9014	.00000	100.00	.00000
AGV 3 Com 2 Ordem%	61.146	.79713	.00000	100.00	.00000
AGV3 1 Ordem 0 Cesto%	7.0040	3.6438	.00000	100.00	.00000
AGV3 2 Ordens 0 Cesto%	5.5120	4.1403	.00000	100.00	.00000
AGV3 1 Ordem 1 Cesto%	14.663	2.4124	.00000	100.00	.00000
AGV3 2 Ordens 1 Cesto%	25.706	1.7001	.00000	100.00	.00000
AGV3 2 Ordens 2 Cesto%	29.929	1.5301	.00000	100.00	.00000
Tempo AGV3 Bloq.Min	.09670	.16128	.00000	.11772	.11772
AGV 4 Movel%	82.406	.46206	.00000	100.00	100.00
AGV 4 Parado%	10.604	2.9035	.00000	100.00	.00000
AGV 4 Carga.Bat%	6.9892	3.6480	.00000	100.00	.00000
AGV 4 Com 1 Ordem%	28.528	1.5828	.00000	100.00	.00000
AGV 4 Com 2 Ordem%	49.694	1.0061	.00000	100.00	100.00
AGV4 1 Ordem 0 Cesto%	4.5580	4.5759	.00000	100.00	.00000
AGV4 2 Ordens 0 Cesto%	2.5206	6.2188	.00000	100.00	.00000
AGV4 1 Ordem 1 Cesto%	23.970	1.7810	.00000	100.00	.00000
AGV4 2 Ordens 1 Cesto%	16.298	2.2662	.00000	100.00	.00000
AGV4 2 Ordens 2 Cesto%	30.875	1.4963	.00000	100.00	100.00
Tempo AGV4 Bloq.Min	.12067	.36254	.03949	.16043	.16043
Cestos em T.Cilindro	.04420	4.6504	.00000	1.0000	.00000
Cestos em Rotor I	.01008	9.9116	.00000	1.0000	.00000
Cestos em Rotor II	.03640	5.2930	.00000	2.0000	.00000
Cestos em Bloco II	.19160	2.9115	.00000	5.0000	.00000
Cestos em Bloco I	1.5985	1.2237	.00000	10.000	4.0000
Cestos em Compon.	.00000	-----	.00000	.00000	.00000
Cestos em E_Pistao I	.04012	4.9854	.00000	2.0000	.00000
Cestos em E_PistaoII	.02293	6.5272	.00000	1.0000	.00000
Cestos em P.Valvula	.00468	14.583	.00000	1.0000	.00000
Cestos em Tampa I	.28047	2.6467	.00000	6.0000	.00000
Cestos em Corpo I	.36429	2.3218	.00000	6.0000	.00000
Cestos em Tampa II	.12762	4.1009	.00000	5.0000	.00000
Cestos em Corpo II	.14707	3.6675	.00000	5.0000	.00000
Cestos em Estatores I	.00000	-----	.00000	.00000	.00000
Cestos em Estatores II	.00000	-----	.00000	.00000	.00000

Num_Ordens_Buffer	5.1447	.38533	.00000	13.000	5.0000
-------------------	--------	--------	--------	--------	--------

COUNTERS

Identifier	Count	Limit
Cestos_T.Cilindro	390	Infinite
Cestos_RotoresI	400	Infinite
Cestos_RotoresII	404	Infinite
Cestos_BlocosII	1208	Infinite
Cestos_BlocosI	1208	Infinite
Cestos_Componentes	0	Infinite
Cestos_EixosI	165	Infinite
Cestos_PistoesI	67	Infinite
Cestos_EixosII	165	Infinite
Cestos_PistoesII	67	Infinite
Cestos_P_ValvulasI	129	Infinite
Cestos_P_ValvulasII	129	Infinite
Cestos_TampaI	2412	Infinite
Cestos_CorpoI	2412	Infinite
Cestos_TampaII	2416	Infinite
Cestos_CorpoII	2412	Infinite
Cestos_EstatoresI	0	Infinite
Cestos_EstatoresII	0	Infinite
Num_Pecas_T.Cil	38610	Infinite
Num_Pecas_RotI	19200	Infinite
Num_Pecas_RotII	19392	Infinite
Num_Pecas_BlocosII	19328	Infinite
Num_Pecas_BlocosI	19328	Infinite
Num_Pecas_Comp	0	Infinite
Num_Pecas_EixoI	19305	Infinite
Num_Pecas_PistaOI	19162	Infinite
Num_Pecas_EixoII	19305	Infinite
Num_Pecas_PistaOII	19162	Infinite
Num_Pecas_P_ValI	19350	Infinite
Num_Pecas_P_ValII	19350	Infinite
Num_Pecas_TampaI	19296	Infinite
Num_Pecas_CorpoI	19296	Infinite
Num_Pecas_TampaII	19328	Infinite
Num_Pecas_CorpoII	19296	Infinite
Num_Pecas_EstatoresI	0	Infinite
Num_Pecas_EstatoresII	0	Infinite

Run Time: 52 min(s) 49 sec(s)

Simulation run complete.

Figura 6.9 - Resultados da Simulação



Tempo_RotorI:	Tempo de espera na estação E1
Tempo_RotorII:	Tempo de espera na estação E2
Tempo_BlocosII	Tempo de espera na estação E5
Tempo_BlocosI	Tempo de espera na estação E9
Tempo_Componentes	Tempo de espera na estação E7
Tempo_E_PistãoI	Tempo de espera na estação E11
Tempo_E_PistãoII	Tempo de espera na estação E12
Tempo_P_Válvulas	Tempo de espera na estação E14
Tempo_TampaI	Tempo de espera na estação E16
Tempo_CorpoI	Tempo de espera na estação E17
Tempo_TampaII	Tempo de espera na estação E18
Tempo_CorpoII	Tempo de espera na estação E19
Tempo_EstatorI	Tempo de espera na estação E20
Tempo_EstatorII	Tempo de espera na estação E22

Quando os cestos são descarregados em uma estação da linha de montagem, os cestos vazios são colocados na estação para expedição de cestos vazios correspondente. Os itens a seguir especificam as informações estatísticas sobre o tempo que os cestos vazios aguardam na estação por um AGV, para serem transportados até a fabricação novamente. A exemplo dos itens anteriores, este tempo começa a ser cronometrado no momento que uma ordem de transporte é gerada e colocada no "buffer" e termina no momento que o AGV carrega o cestos aí colocados.

T_CestoVazio_TampaI	Tempo de espera na estação M15_1
T_CestoVazio_TampaII	Tempo de espera na estação M15_3
T_CestoVazio_CorpoII	Tempo de espera na estação M15_4
T_CestoVazio_CorpoI	Tempo de espera na estação M15_2
T_CestoVazio_RotorI	Tempo de espera na estação M6_1
T_CestoVazio_RotorII	Tempo de espera na estação M6_2
T_CestoVazio_TCil	Tempo de espera na estação M6_3
T_CestoVazio_P_VálII	Tempo de espera na estação M13_2
T_CestoVazio_P_VálI	Tempo de espera na estação M13_1
T_CestoVazioEixoPI	Tempo de espera na estação M10_1
T_CestoVazioEixoPII	Tempo de espera na estação M10_2
T_CestoVazio_BlocoI	Tempo de espera na estação M8
T_CestoVazio_BlocoII	Tempo de espera na estação M4
T_CestoVazio_EstatorI	Tempo de espera na estação M21_1
T_CestoVazio_EstatorII	Tempo de espera na estação M21_2

O item "Tempo\_Ordem\_Buffer", fornece as informações estatísticas sobre o tempo que uma ordem de transporte permanece no "buffer" de ordens até ser executada pelo CLP. Pode ser interpretado também como sendo o intervalo de tempo entre a geração de uma ordem de transporte e o momento que esta ordem é retirada do "buffer" e passada para um AGV.

Os itens seguintes fornecem informações estatísticas sobre o tempo em que as estações receptoras de cestos cheios nas linhas de montagem ficam vazias, sem cestos para descarregar.

Tempo_TCiI_Vazia	Tempo estação M3 vazia (sem cestos)
Tempo_RotI_Vazia	Tempo estação M1 vazia (sem cestos)
Tempo_RotII_Vazia	Tempo estação M2 vazia (sem cestos)
Tempo_BlocII_Vazia	Tempo estação M5 vazia (sem cestos)
Tempo_BlocI_Vazia	Tempo estação M9 vazia (sem cestos)
Tempo_Comp_Vazia	Tempo estação M7 vazia (sem cestos)
Tempo_EPistI_Vazia	Tempo estação M11 vazia (sem cestos)
Tempo_EPistII_Vazia	Tempo estação M12 vazia (sem cestos)
Tempo_PValI_Vazia	Tempo estação M14_1 vazia (sem cestos)
Tempo_PValII_Vazia	Tempo estação M14_2 vazia (sem cestos)
Tempo_Tampal_Vazia	Tempo estação M16 vazia (sem cestos)
Tempo_CorpoI_Vazia	Tempo estação M17 vazia (sem cestos)
Tempo_Tampall_Vazia	Tempo estação M18 vazia (sem cestos)
Tempo_CorpoII_Vazia	Tempo estação M19 vazia (sem cestos)
Tempo_EstatI_Vazia	Tempo estação M20 vazia (sem cestos)
Tempo_EstatII_Vazia	Tempo estação M22 vazia (sem cestos)

O último item de "TALLY VARIABLES" "TempoNoSistema" fornece informações estatísticas sobre o tempo que um cesto gasta dentro do sistema desde o momento que um cesto é carregado com peças até o momento que os cestos vazios voltam da linha de montagem para a fabricação onde são recarregados.

O segundo conjunto de variáveis são referentes a "DISCRETE-CHANGE VARIABLES" fornecendo informações sobre as variáveis discretas analisadas na simulação.

Os primeiros itens são referentes a uma análise estatística dos AGVs:

"AGV 1 MoveI%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está em movimento, esteja vazio ou carregado, cumprindo uma ordem de transporte ou simplesmente liberando o caminho para a passagem de um outro AGV.

"AGV 1 Parado%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está ativo mas parado, sem ordens de transporte para executar.

"AGV 1 Carga.Bat%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está em carga de bateria, ou seja, desativado para qualquer outra ordem de transporte.

"AGV 1 Com 1 Ordem%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está executando apenas uma ordem de transporte, independente se o AGV está com ou sem carga (cesto).

"AGV 1 Com 2 Ordens%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com duas ordens de transporte, independente também do número de cestos que o AGV está transportando.

"AGV1 1 Ordem 0 Cesto%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com uma ordem de transporte mas não possui nenhum cesto sobre ele.

"AGV1 2 Ordens 0 Cesto%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com duas ordens de transporte mas não possui nenhum cesto sobre ele.

"AGV1 1 Ordem 1 Cesto%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com uma ordem de transporte e um cesto sobre ele sendo transportado.

"AGV1 2 Ordem 1 Cesto%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com duas ordens de transporte e um cesto sobre ele sendo transportado.

"AGV1 2 Ordem 2 Cesto%" representa o percentual do tempo que o AGV 1 está com duas ordens de transporte e dois cestos sobre ele sendo transportados, ou seja, o AGV está com carga (cesto) máxima.

O item "Tempo AGV1 Bloq.Min" fornece informações estatísticas sobre o tempo que o AGV 1 leva para acessar uma zona de controle. Estas interpretações também devem ser realizadas para os outros AGVs.

Os últimos itens no "Identifier" fornecem informações estatísticas sobre o número de cestos acumulados nas estações na fabricação esperando que as condições de transporte sejam estabelecidas. Por exemplo, "Cestos em T.Cilindro" fornece informações sobre o número de cestos acumulados na estação de "Tampa do Cilindro" na fabricação; "Cestos em Tampa I" fornece informações sobre o número de cestos acumulados na estação de "Tampa I da produção"; O mesmo acontece para os outros casos variando-se apenas o nome da estação.

O último item deste grupo de variáveis é "Num\_Ordens\_Buffer" especificando as informações sobre o número de ordens de transporte geradas e colocadas no "buffer" de ordens. Esta informação não se refere ao tempo que uma ordem permanece no "buffer" como no caso do "TALLY VARIABLES", mas sim ao número de ordens que estão no mesmo.

O último grupo de variáveis "COUNTERS" especificam a produção de cada tipo de peça. Esta contagem é realizada quanto os cestos cheios são entregues nas estações das linhas de montagem e são descarregados. Observação: A contagem é realizada apenas quando todo o cesto é descarregado.

Cestos_T.Cilindro	Número de cestos com Tampas do Cilindro entregues na
-------------------	--

	montagem.
Cestos_RotoresI	Número de cestos com Rotores I entregues na montagem.
Cestos_RotoresII	Número de cestos com Rotores II entregues na montagem.
Cestos_BlocosII	Número de cestos com Blocos II entregues na montagem.
Cestos_BlocosI	Número de cestos com Blocos I entregues na montagem.
Cestos_Componentes	Número de cestos com Componentes entregues na montagem.
Cestos_EixosI	Número de cestos com Eixos I entregues na montagem.
Cestos_PistõesI	Número de cestos com Pistões I entregues na montagem.
Cestos_EixosII	Número de cestos com Eixos II entregues na montagem.
Cestos_PistõesII	Número de cestos com Pistões II entregues na montagem.
Cestos_P_VálvulasI	Número de cestos com Placas Válvulas I entregues na montagem.
Cestos_P_VálvulaII	Número de cestos com Placas Válvulas II entregues na montagem.
Cestos_Tampal	Número de cestos com Tampas I entregues na montagem.
Cestos_CorpoI	Número de cestos com Corpos I entregues na montagem.
Cestos_TampalII	Número de cestos com Tampas II entregues na montagem.
Cestos_CorpoII	Número de cestos com Corpos II entregues na montagem.
Cestos EstatoresI	Número de cestos com Estatores I entregues na montagem.
Cestos_EstatoresII	Número de cestos com Estatores II entregues na montagem.
Num_Peças_T.Cil	Número de Tampas do Cilindro entregues na montagem.
Num_Peças_RotI	Número de Rotores I entregues na montagem.
Num_Peças_RotII	Número de Rotores II entregues na montagem.
Num_Peças_BlocosII	Número de Blocos II entregues na montagem
Num_Peças_BlocosI	Número de Blocos I entregues na montagem.
Num_Peças_Comp	Número de Componentes entregues na montagem.
Num_Peças_EixoI	Número de Eixos I entregues na montagem
Num_Peças_PistãoI	Número de Pistões I entregues na montagem.
Num_Peças_EixoII	Número de Eixos II entregues na montagem.
Num_Peças_PistãoII	Número de Pistões II entregues na montagem.
Num_Peças_P_ValI	Número de Placas Válvulas I entregues na montagem
Num_Peças_P_ValII	Número de Placas Válvulas II entregues na montagem.
Num_Peças_Tampal	Número de Tampas I entregues na montagem.
Num_Peças_CorpoI	Número de Corpos I entregues na montagem.
Num_Peças_TampalII	Número de Tampas II entregues na montagem.
Num_Peças_CorpoII	Número de Corpos II entregues na montagem.
Num_Peças_EstatoresI	Número de Estatores I entregues na montagem.
Num_Peças_EstatoresII	Número de Estatores II entregues na montagem.

#### 6.4.2 Analisando os Resultados da Simulação.

No primeiro conjunto de resultados (“TALLIES”) pode-se constatar que o tempo médio que um cesto ou pilha de cestos aguardaram nas estações de carga por transporte foram valores próximos. Por exemplo, o tempo médio que os cestos aguardaram na estação E3 (“tampa do cilindro”) foi de 5.9902 minutos com uma variação de 0.46188. No caso dos cestos que aguardaram por transporte na estação E1 (“Rotor I”) o tempo médio de espera foi de 5.8908 minutos com uma variação de 0.44194. Já para os cestos na estação E2 (“Rotor II”) o tempo médio de espera mostrou-se um pouco maior: 8.6454 minutos com uma variação de 0.33758. Estas diferenças estão obviamente ligadas a todo o processo de aleatoriedade do modelo mas que não representam variações significativas, mostrando que há um atendimento por igual, por parte dos AGVs, a todas às estações, priorizando apenas as ordens de transporte no “buffer” de ordens, e não qualquer outra estação de carga. Estas observações podem ser conferidas na figura 6.9 até o item “Tempo\_P\_Valvulas” (componentes pertencentes ao mesmo setor de fabricação - usinagem).

Para os demais componentes, pertencentes ao setor de soldagem, os tempos de espera por transporte foram menores, o que corresponde a uma maior frequência de atendimento por parte dos AGVs. Por exemplo, para a estação E16 (“Tampa I”), referenciada pelo “Identifier Tempo\_Tampal”, o tempo médio que os cestos aguardaram por transporte foi de 2.3830 minutos com uma variação de 0.61820.

A questão de maior frequência de atendimento pode ser observada no item “Observation”. Por exemplo, para o caso da estação E1 (“Rotor I”), o número final de atendimentos foi de 50, ou seja, no tempo de simulação considerado, os AGVs carregaram 50 vezes os cestos (pilhas) aí colocados. Para o caso da estação E16 (“Tampa I”) esta observação do número de transporte realizados foi maior, 302. Esta diferença está no fato que as peças são transportadas em cestos, e que os mesmos para os diferentes componentes comportam um número “x” diferente de peças como já especificado, além do número de pilhas formadas também serem diferentes. Desta forma, devemos analisar o número de peças entregues (carregadas) e não o número de cestos.

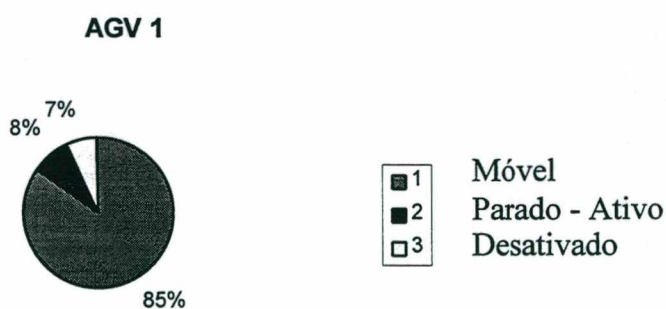
Os itens entre “T\_CestoVazio\_Tampal” e “T\_CestoVazio\_EstatorII” referem-se aos tempos em que os cestos vazios, após serem descarregados na montagem, esperam por transporte nas estações correspondentes. Nestes itens, é importante fazer a seguinte comparação com os itens anteriores: número de observações realizadas (“Observations”). Esta observação é importante porque mostra que tudo o que o AGV transportou para a montagem (número de cestos), de acordo com a política de escalonamento implementada, foi devolvido para a produção novamente. Por exemplo, foram transportadas 302 pilhas de cestos com o componente “Tampa I” para a montagem neste tempo de simulação. De acordo com o item “T\_CestoVazio\_Tampal” foram também transportadas 302 pilhas de cestos vazios para a produção. Isto significa que houve um equilíbrio entre a entrega e a devolução dos cestos. Já para o componente da estação E3 (“Tampa do Cilindro”) o

número de pilhas de cestos carregadas foi de 196, mas apenas 97 pilhas foram entregues. Pergunta-se, por que esta diferença? A explicação está no fato de que, quando os cestos são transportados da fabricação para a montagem, os mesmos estão empilhados em número de 2 e quando os cestos vazios são devolvidos da montagem para a fabricação, os mesmos são empilhados em número de 4. Portanto, se o número de observações registradas para “T\_CestoVazio\_TCil” foi de 97, significa que houve uma devolução de  $2 \times 97 = 194$  pilhas de 2 cestos para a produção, próximo ao valor 196 como desejado.

Ainda referente a este primeiro conjunto de resultados, os itens seguintes mostram os resultados obtidos em relação ao “buffer” de ordens de transporte e aos tempos em que as estações na linhas de montagem ficaram sem cestos para descarregar. É importante que este tempo seja o menor possível, pois uma estação sem cesto significa linha de montagem parada, obviamente não considerando questões de estoques. Verifica-se que para um tempo de 2900 minutos (3100 - 200 de “warmup”), um total de 4236 ordens de transporte foram executadas pelo CLP e que cada ordem, em média, gastou 3.5242 minutos para ser executada.

Por fim, o tempo médio que os cestos gastaram no sistema foi de 50.656 minutos com uma variação de 0.39655. No tempo analisado, 14386 pilhas de cestos circularam pelo sistema. Este tempo é bastante importante principalmente para estabelecer a questão de quando o sistema entra em regime permanente de produção.

O outro conjunto de variáveis é referente aos AGVs e ao número de cestos acumulados nas estações de carga. Para os AGVs de número 1 e 3, AGVs que atendem o setor de usinagem, percebe-se que o percentual de movimentação, em média, de ambos os veículos foram bastante próximos: 84.686% e 85.718% respectivamente, mostrando que não houve prioridades de transporte em relação ao número do AGV. A figura 6.10 mostra os gráficos dos percentuais médios de utilização dos AGVs 1 e 3. Os valores estão arredondados.



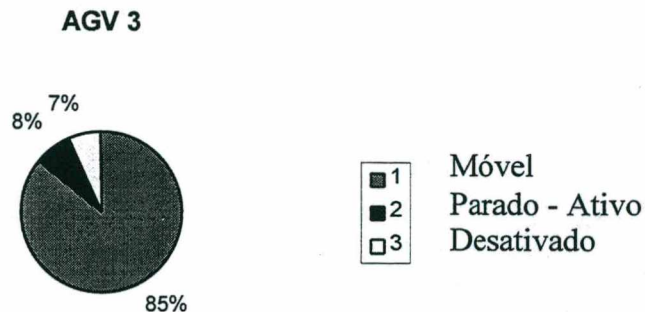


Figura 6.10 - Utilização dos AGVs 1 e 3

Para o AGV 1, observou-se que, em média, cerca de 29% referentes a utilização do AGV, o veículo esteve com duas ordens de transporte e transportando 2 cestos. Esta é uma situação preferencial de acordo com a política de escalonamento implementada, fazer o AGV se movimentar com carga máxima, ou seja, posição da frente e traseira ocupadas. Ainda para o AGV 1, cerca de 25% em média, o AGV esteve com uma posição ocupada com cestos (cheios ou vazios) mas com 2 ordens de transporte, uma ordem para entregar os cestos em alguma estação de descarga e outra para buscar os cestos em uma outra estação de carga. Por outro lado, o percentual em que o AGV esteve com ordens de transporte (1 ou 2 ordens) sendo executadas mas sem cestos sendo transportados, foram valores baixos, cerca de 5 a 7% da utilização do AGV. Já para o AGV de número 3, o percentual em que o veículo ficou com carga máxima foi de aproximadamente 30%, bastante semelhante ao AGV de número 1. O mesmo aconteceu quando o AGV 3 está com 2 ordens de transporte e 1 posição ocupada com cestos, cerca de 26% da utilização do AGV. Constatou-se também que este veículo possuiu um baixo percentual quando se movimentando sem cestos sobre ele (AGV vazio com 1 ou 2 ordens de transporte), na faixa de 5 a 7% como no caso do AGV 1.

Para os outros dois AGVs (AGVs de número 2 e 4) que atendem o setor de soldagem, os percentuais de movimentação dos veículos foram um pouco menores do que os dois outros AGVs (1 e 3). Para o AGV 2, 82.003% em média o AGV esteve se movimentando e para o AGV 4, 82.406%. Estes percentuais médios de movimentação foram menores em relação aos AGVs 1 e 3 pelo fato de que os AGVs 2 e 4 atendem um menor número de estações, além das distâncias serem mais curtas, permitindo os mesmos executarem rapidamente as ordens de transporte. A figura 6.11 mostra os gráficos da utilização destes veículos.

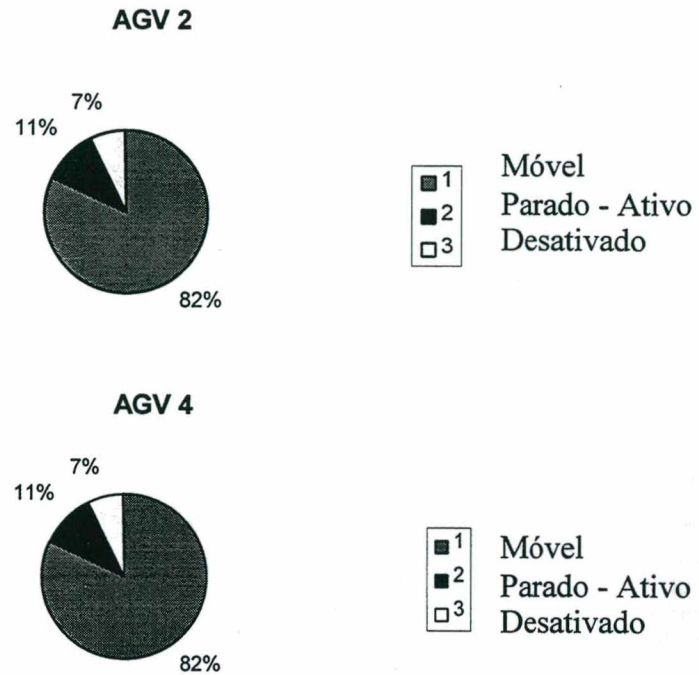


Figura 6.11 - Utilização dos AGVs 2 e 4

Como a frequência para carregamento de cestos neste setor é maior do que o setor de usinagem, os AGVs 2 e 4 possuíram um maior percentual com as 2 posições ocupadas (carga máxima). Isto realmente se verificou conforme mostra a figura 6.9: em média, 32.548% para o AGV 2 e 30.875% para o AGV 4. A figura 6.12 mostra uma comparação dos percentuais de carga máxima (2 cestos sendo transportados) dos quatro AGVs.

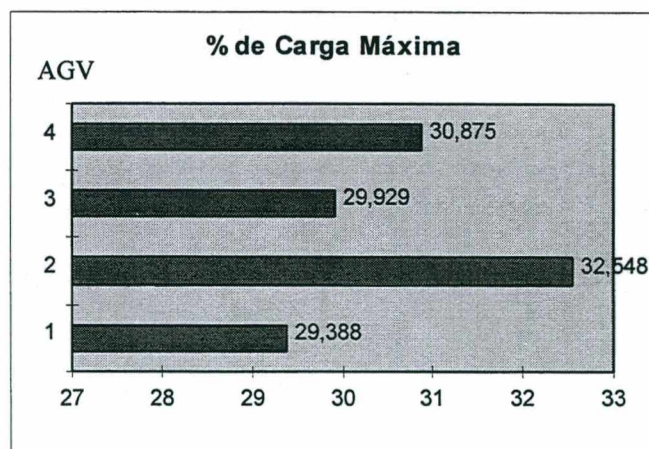


Figura 6.12 - Percentuais de carga Máxima

Pode-se observar ainda que, conforme descrito anteriormente, devido as distâncias serem mais curtas e o número de estações que os AGVs 2 e 4 atendem ser menor, o percentual que estes veículos ficaram parados (cerca de 10%) foi maior do que o percentual dos AGVs 1 e 3 (cerca de 8%). Ver figura 6.13.



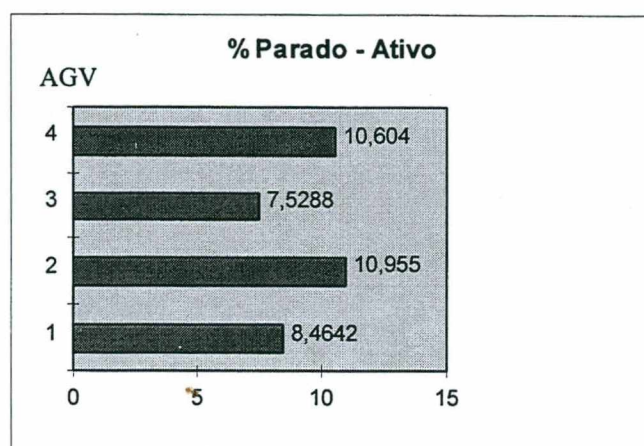


Figura 6.13 - Percentuais - AGVs Parados Esperando Ordens

Realizando uma última comparação do desempenho dos AGVs, podemos colocar o percentual em que os veículos estiveram executando ordens de transporte (1 ou 2) mas não possuíam carga (AGV se movimentando vazio). Estas informações podem ser visualizadas na figura 6.14.

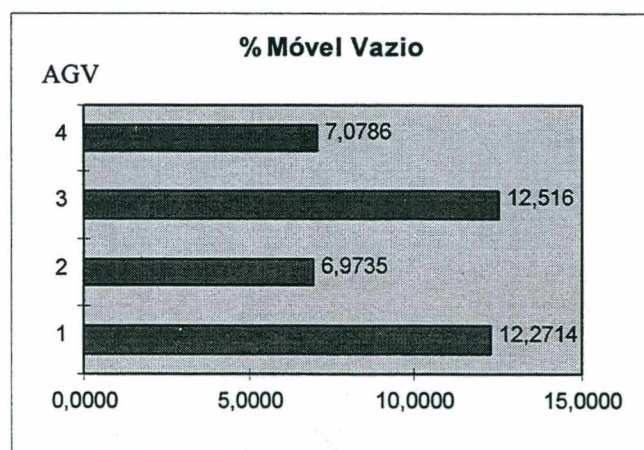


Figura 6.14 - Percentuais - AGVs em Movimento sem Carga

Em relação ao número de cestos acumulados nas estações é importante observar que, em média, não houve um acúmulo de cestos maior do que a capacidade da estação, embora isso tenha ocorrido em algum tempo pela observação do "Maximum" da variável. Isto permite concluir que não houve deteriorização na forma de atendimento às estações de carga por parte dos AGVs, ou seja, um acúmulo excessivo de cestos em alguma estação.

Por fim, o último conjunto de resultados mostra o número de cestos e peças correspondentes entregues em cada estação de descarga nas linhas de montagem.

Como foram simulados 3100 minutos ( $\cong$  51.67 horas) e as estatísticas foram analisadas somente em 2900 minutos ( $\cong$  48.33 horas), descartando as observações nos 200 minutos iniciais, a uma taxa de produção de 400 peças/hora, as observações registradas no

fim da simulação referentes ao número de peças entregues nas estações deveriam estar em torno de  $400 \times 48.33 = 19332$  peças entregues nas linhas de montagem. A exceção é para os componentes “Tampa do Cilindro” (estação E3) e “Placa Válvula” (estação E14) onde são produzidas 800 peças/hora. Portanto, a produção final de “Tampa do Cilindro” no final do tempo considerado foi de 38664 peças e de “placa válvulas I e II” foi 19350 cada.

Realizando algumas comparações, observamos que os resultados finais se aproximaram dos valores teóricos como desejado. Por exemplo para o componente “Tampa do Cilindro” a produção no fim da simulação foi de 38610 peças, portanto:

$$\frac{(38664 - 38610) \times 100\%}{38610} \cong 0.14\%$$

Apenas uma diferença de 0.14% entre o valor teórico e o valor encontrado no fim da simulação.

Vejam os para um outro componente, “Corpo II” por exemplo. A produção final na simulação foi de 19296. Portanto:

$$\frac{(19332 - 19296) \times 100\%}{19296} \cong 0.19\%$$

Para os outros componentes, a diferença também estará circulando em torno destes valores.

Como **análise final** chega-se que, como não houve acúmulos excessivos de cestos nas estações de carga, os tempos médios de espera nas estações não foram muito diferenciados para diversos componentes (não houve deteriorização do tempo em que os cestos esperaram em uma estação em prol de uma outra estação qualquer), a utilização dos AGVs apresentaram um percentual bom de utilização, não sub-utilizando e também não super-utilizando os veículos, além do que o número de peças entregues nas estações atingiram as expectativas, conclui-se que, baseado na validação realizado sobre o modelo de simulação, o sistema de AGVs da EMBRACO, formado por 4 AGVs, **comporta** uma produção de **400 peças/hora**. A capacidade de atendimento dos AGVs é maior do que a capacidade nominal da fábrica (400 peças por hora) e portanto, o sistema de AGVs **não constitui um gargalo de produção**.

## 6.5 DESENVOLVIMENTO DA ETAPA

A etapa de experimento e análise dos resultados do modelo de simulação do sistema de transporte por AGVs da EMBRACO foi realizada no LCMI - UFSC durante um período de 5 dias.

## 6.6 CONCLUSÃO

Este último capítulo teve como objetivo descrever todo o processo de execução e análise dos resultados do modelo de simulação do sistema de AGVs da EMBRACO.

Caracterizado como um sistema não terminal, toda a metodologia para uma análise correta dos resultados foi realizada, definindo o período de "warmup" da simulação e analisando os resultados em regime permanente.

Tão importante quanto a execução do modelo é a interpretação dos resultados. Tendo em vista esta importância, este capítulo descreveu todos os resultados de saída coletados no fim da simulação, possibilitando ao usuário a interpretação correta dos dados observados durante a execução do modelo.

Por fim, uma análise dos resultados finais foi realizada, respondendo as questões levantadas na fase de definição problema e dos objetivos a serem alcançados.

# CONCLUSÃO

---

O crescente uso da simulação na indústria, comércio, negócios, educação e ciência não pode ser negado. Exemplos demonstram a versatilidade do uso da mesma para a resolução de uma grande variedade de problemas através de experimentos realizados a nível computacional (modelo do sistema) e não sobre o próprio sistema real, acarretando em baixos custos, eficiência e segurança na elaboração e execução destes experimentos.

Baseado nas grandes vantagens de se utilizar a simulação como ferramenta de projeto como visto no capítulo 2, e poder aplicá-la no desenvolvimento de um projeto industrial para a determinação de como o sistema deveria ser e como deveria funcionar, este trabalho teve como objetivo construir um modelo de simulação para avaliação de desempenho do sistema de transporte da fábrica II da EMBRACO (AGVS). Para atingir estes objetivos, o projeto foi dividido em várias fases para facilitar todo o desenvolvimento do trabalho:

- **Definição do Problema e Objetivos;**
- **Modelo conceitual e Coleta de dados;**
- **Codificação e Verificação;**
- **Validação do modelo;**
- **Projeto experimental;**
- **Execução e Análise dos resultados finais;**
- **Apresentação dos resultados.**

Cada fase foi minuciosamente estudada e implementada com o objetivo de garantir sucesso como resultado final, e estas evoluíram a medida que dúvidas foram sendo esclarecidas.

A cada etapa realizada, um resumo das atividades foi feito com a finalidade de garantir maior participação e integração dos engenheiros da empresa envolvidos no projeto. Participação esta, fundamental em todo o projeto, desde a definição do sistema até a implementação final.

Concluindo o trabalho, podemos ressaltar quatro grandes problemas encontrados durante o período de projeto:

1. Desconhecimento do funcionamento do sistema de transporte, principalmente questões referentes à política de escalonamento e rotas dos AGVs, dificultando toda a fase inicial do projeto.

2. A instabilidade inicial do sistema de AGVs, com a ocorrência de bloqueios, entregas de cestos à estações erradas, etc., além de fortes interferências humanas influenciando todo o sistema.

3. Durante a fase de codificação do modelo, houve algumas alterações referentes ao sistema de transporte, como por exemplo, alterações na política de escalonamento. Estas alterações também foram realizadas no modelo a medida que foram sendo executadas sobre o sistema real, acarretando em um maior tempo de codificação e verificação do código implementado.

4. A dificuldade de validar o modelo de simulação. Algumas observações foram realizadas com o objetivo de comparar os resultados de saída do modelo com os dados do sistema real como visto no capítulo 5. Porém, a falta de observações realizadas sobre o sistema impediram de executar uma validação estatística do modelo, e assim, os resultados finais de um experimento de simulação foram comparados com dados imprecisos do comportamento do sistema real, obtendo desta forma, uma validação estatística também imprecisa. Mesmo sabendo destes problemas, uma comparação dos resultados foi realizada com a finalidade de verificar o comportamento do modelo e traçar uma metodologia para realizar esta importante e fundamental etapa de projeto. Além disso, uma validação visual foi realizada por engenheiros da EMBRACO, permitindo acompanhar a animação de todo o processo de transporte como, o movimento dos AGVs ao longo dos caminhos, as tarefas de carregamento e descarregamento de cestos nas estações origem e destino dos AGVs respectivamente, etc.

Cabe lembrar que estes quatro problemas principais foram decorrentes da fase de implementação do próprio sistema de AGVs da EMBRACO. Atualmente, os problemas 1, 2 e 3 citados já foram solucionados e todo o processo caminha para atingir um regime permanente de produção, resolvendo por fim, o último problema colocado (validação estatística confiável do modelo).

Embora os problemas da validação estatística não puderam ser solucionados, o modelo de simulação permitiu solucionar alguns problemas de interesse:

1. Possibilitou adquirir um maior conhecimento de todo o funcionamento do sistema, principalmente questões referentes a política de escalonamento.

2. Possibilitou realizar um estudo de caminhos alternativos que os AGVs poderiam percorrer diminuindo o tempo de transporte das peças. Como visto no capítulo 4, foram dois os caminhos modificados no sistema real. Esta possibilidade de alteração dos caminhos alertou os engenheiros da empresa a realizarem outras modificações nas rotas dos AGVs.

3. Mesmo sem uma validação estatística confiável, os resultados finais de um experimento de simulação foram úteis para um estudo preliminar de todo o sistema de transporte, possibilitando realizar uma avaliação sobre o comportamento do sistema em regime permanente.

# PERSPECTIVAS

---

---

O modelo de simulação do sistema de transporte da empresa EMBRACO constitui uma importante ferramenta de projeto, podendo ser aplicada em diversas áreas, desde a área industrial até a área de planejamento refletindo nas decisões de como o sistema deveria ser efetiva e eficientemente usado.

A finalização da construção do modelo não implica no fim da sua utilização. Pelo contrário, o modelo está pronto para a realização de inúmeros experimentos a serem selecionados pelos engenheiros da empresa.

Como algumas perspectivas para a utilização do modelo temos:

1. Realização de uma validação estatística do modelo, comparando os resultados de um experimento de simulação com observações mais significativas e confiáveis do sistema real.

2. Testes com novas taxas de produção afim de verificar o comportamento do sistema em determinadas situações de interesse. Como o sistema de transporte não é um gargalo de produção, suportando a produção de 400 peças por hora, pergunta-se: qual a máxima capacidade de atendimento que os AGVs podem atender? Esta questão pode ser respondida com a execução de experimentos de simulação.

3. Determinação do número adequado de cestos existentes no sistema para realizar o transporte de peças.

4. Avaliação do comportamento do sistema de transporte na retirada ou inclusão de novos veículos.

5. Inclusão de novos detalhes na estrutura do programa, como por exemplo, verificar como o sistema responde quando há uma quebra de um veículo, verificar os problemas decorrentes da interferência humana quando na retirada de cestos das estações, etc.

6. Alteração da política de escalonamento e comparação entre as mesmas para verificar a que apresenta melhores resultados.

7. Testes para determinar novas rotas dos AGVs.

8. Inclusão de novos índices de desempenho.

9. Integração do modelo de simulação com o sistema real (simulação "On Line"), entre outras aplicações.

Todas estas questões podem ser respondidas através de experimentos de simulação e os resultados finais comparados antes que qualquer decisão seja tomada.



# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

[1] C. Dennis Pegden, Robert E. Shannon e Randall P. Sadowski, "Introduction to Simulation Using SIMAN", 1990.

[2] Jerry Banks e John S. Carson, II, "Discrete-Event System Simulation", 1994.

[3] Peter Gibson e Palitha S. Welgama, "Simulation Methodology in Facilities Design: Knowledge From a Practical Application", Industrial engineering, Setembro de 1993, páginas 52 a 57.

[4] Paul A. Fishwick, "The Role of Process Abstraction in Simulation", IEEE Transactions on Systems, Man And Cybernetics, Volume 18, Janeiro/Fevereiro de 1988, páginas 18 a 39.

[5] Carlos Fernando Martins, "Um Experimento de Simulação para Avaliação de um Processo Industrial", Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

[6] W. R. Schemel of EPRI Chemical & Petroleum e P.D Parikh of Shell Development Co, "Simulation in Evaluation of Scheduling Policies in Composites Manufacturing", Industrial Engineering, Novembro de 1993, páginas 35 a 38.

[7] Ben U. Nwoke e Del R. Nelson, "An Overview of Computer Simulation In Manufacturing", Industrial Engineering, Julho de 1993, páginas 43 a 45.

[8] Michael B. Tompson - AutoSimulation, "Expanding Simulation Beyond Planning And Design", Industrial Engineering, Outubro de 1994, páginas 64 a 67.

[9] Chun-Hung Chen, "An Effective Approach to Smartly Allocate Computing Budget For Discrete Event Simulation", Proceedings of the 34th Conference on Design & Control, New Orleans, LA, Dezembro de 1995, páginas 2598 a 2603.

- [10] H. T. Papadopoulos, C. Heavey e J. Browne, "Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design", Editora Chapman & Hall, Capítulo 6, 1994.
- [11] Steward Robinson, "Simulation Projects Building the Right Conceptual Model", Industrial Engineering, Setembro de 1994, páginas 34 a 36.
- [12] Averill M. Law, Michael G. McComas e Stephen G. Vincente, "The Crucial Role Of Input Modeling In Successful Simulation Studies", Industrial Engineering, Julho de 1994, páginas 55 a 59.
- [13] Lori Baxter e M. Eric Johnson, "Don't Implement Before you Validate", Industrial Engineering, Fevereiro de 1993, páginas 60 a 62.
- [14] W. David Kelton, "Statistical Analysis Methods Enhance Usefulness, Reliability of Simulation Models", Computer Simulation of Manufacturing Systems, Simulations Series, Part 5: Setembro de 1986, páginas 74 a 86.
- [15] Paul L. Meyer, "Probabilidade, Aplicações a Estatística", Segunda Edição, 1993, Capítulo 12.
- [16] Van B. Norman, "Future Directions In Manufacturing Simulation", Industrial Engineering, Julho de 1992, páginas 36 a 37.
- [17] Kal Mabrouk, "Mentorship: A Stepping Stone to Simulation Success", Industrial Engineering, Fevereiro de 1994, páginas 41 a 43.
- [18] Jack Mott and Ken Tumary, "Developing a Strategy for Justifying Simulation", Industrial Engineering, Julho de 1992, páginas 38 a 42.
- [19] M. P. Groover, "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing", Prentice Hall, USA, 1987.
- [20] N. Viswanadham and Y. Narahari, "Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems", Prentice Hall, USA, 1992.
- [21] James A. Rehg, "Computer-Integrated Manufacturing" Prentice Hall, USA, capítulo 11, 1994.

[22] Itsuo Hatono, Keiichi Yamagata and Hiroyuki Tamura, "Modeling and On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using Stochastic Petri Nets", IEEE Transactions on Software Engineering, volume 17, número 2, Fevereiro de 1991, páginas 126 a 131.

[23] Falko Bause, "Queueing Petri Nets. A Formalism for the Combined Qualitative and Quantitative Analysis of Systems", IEEE, Maio de 1993, páginas 14 a 23.

[24] Belhassen Mazigh, Julien Gresser and François Simon, "GSPN Modeling Methods for Performance and Dependability Evaluation of a Real-life Flexible manufacturing Systems", IEEE, Maio de 1993, páginas 290 a 299.

[25] Giorgio Bruno and Maurizio Morisio, "Petri-Net Based Simulation of Manufacturing Cells", IEEE, Março de 1987, páginas 1174 a 1179.

[26] Márcio Rillo, "Controle de Sistemas de Manufatura por Redes de Petri e Regras de Produção", XXII Congresso Nacional de Informática 1989, páginas 677 a 681.

[27] Systems Modeling Corporation, "The SIMAN IV Reference Guide", Copyright 1989.

[28] Systems Modeling Corporation, "CINEMA IV Reference Guide", Copyright 1990.

[29] Systems Modeling Corporation, "The SIMAN/CINEMA IV UNIX WorkStation System Operation and Installation Guide", Copyright 1991.

[30] William J. Stevenson, "Estatística Aplicada à Administração", Harbra Ltda, 1986.

[31] Alexander, André, "Sistema de Transporte Fábrica II", Relatório Técnico da Embraco, 1996.

[32] R. E. King., and C. Wilson, "A Review of Automated Guided-Vehicle System Design and Scheduling", Production Plan and Control, 1991, páginas 44-51.

[33] Critiana Felipe e Silva, "Revista Tecnológica", número 10 - Julho de 1996, página 22 - 29.

# ANEXO 1

---

---

## 1. VISÃO GERAL DO SIMAN

SIMAN [1] é uma linguagem geral de simulação que suporta tanto a simulação de modelos contínuos quanto discretos.

A figura A.1 mostra como os programas do SIMAN são organizados.

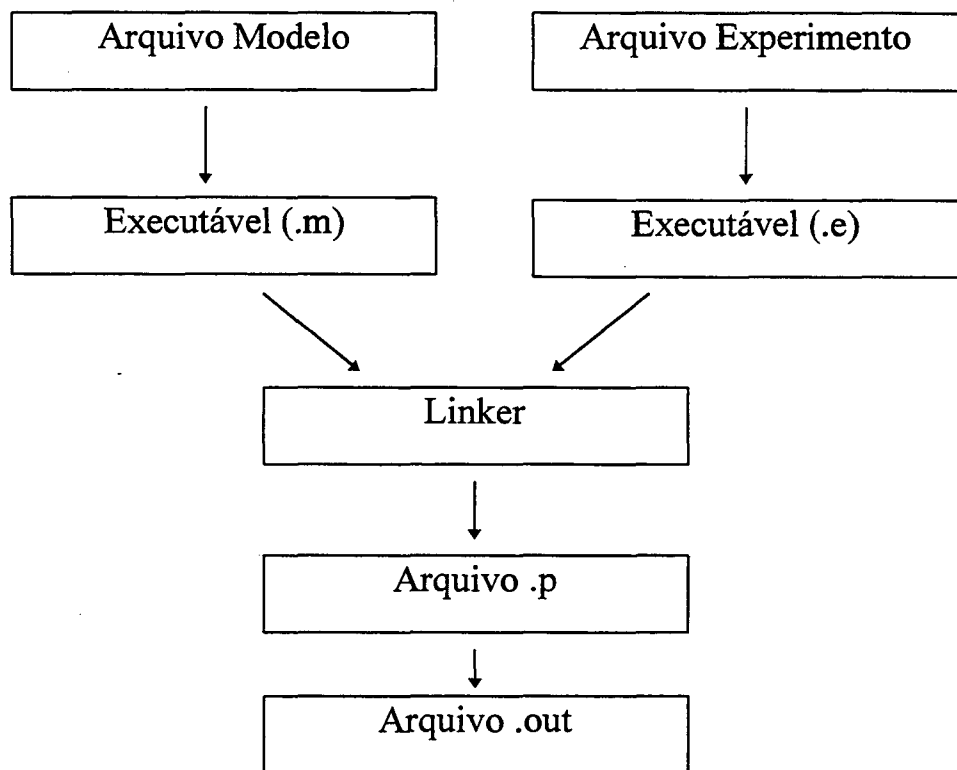


Figura A.1 - Arquivos do SIMAN

O programa contém dois arquivos escritos pelo usuário: o modelo e o experimento. Os arquivos são compilados separadamente e depois “linkados” para criar o arquivo executável. A execução deste arquivo é que vai gerar um conjunto de resultados de saída

do modelo. Estes resultados, por sua vez, podem ser analisados estatisticamente utilizando o processador de saída do SIMAN.

No arquivo modelo, o usuário escreve a estrutura do modelo, identificando as características físicas e lógicas do sistema. Estas características são representadas por um diagrama de blocos onde cada bloco executa uma função específica.

No arquivo experimento, condições experimentais sob as quais o modelo de simulação é executado são estabelecidas. Por exemplo, número de máquinas em uma estação, número de estações, número de veículos de transporte, etc., e também parâmetros relacionados a tempo e número de execuções de simulação.

A separação dos arquivos modelo e experimento pode facilitar os experimentos de simulação, tendo em vista que o usuário necessita apenas alterar as condições de cada experimento no arquivo experimento sem a necessidade de alterar a estrutura do modelo no arquivo modelo. Para maiores detalhes ver [1] e [27].

Alguns dos blocos principais do SIMAN estão colocados a seguir:

. **CREATE, NB: TBC,MC;** Bloco que cria as entidades. A cada “TBC” intervalo de tempo “NB” entidades são criadas e colocadas no modelo. Este processo de criação continua até que “MC” entidades tenham sido criadas.

. **ASSIGN: VAR = VALOR;** Bloco que permite ajustar valores de variáveis “VAR” e ou atributos associados com as entidade que chegam neste bloco.

. **QUEUE, NOME, CAP, DEST;** Bloco que modela uma fila de espera (“buffer”), com um nome identificando a fila e “CAP” identificando a capacidade.

Se uma entidade chegar na fila na qual o número de entidades esperando é igual a capacidade da fila, a entidade que chegou é enviada para um outro bloco com “label” dest.

. **SEIZE, PR:NOME, QTY;** Bloco que modela a alocação de um recurso por parte de uma entidade. Este recurso possui um “NOME”, a quantidade a ser alocada e uma prioridade de alocação. Este bloco deve sempre ser precedido por uma fila para armazenar as entidades que esperam para alocar o recurso.

. **DELAY: TEMPO;** Bloco que modela uma atividade, tal como o tempo de processamento de uma máquina.

. **RELEASE:NOME,QTY;** Bloco que modela a liberação de um recurso identificado com um “NOME” e a capacidade a ser liberada.

Geralmente, para modelar uma operação em uma máquina, por exemplo, estes quatro últimos blocos são suficientes: QUEUE; SEIZE; DELAY; RELEASE.

. **ALLOCATE,PR:NOME;** Bloco que modela a alocação de um transportador identificado com um “NOME”, com uma prioridade para alocação. Outro bloco semelhante é o bloco **REQUEST**. Estes blocos são utilizados para alocar transportadores intermitentes (AGVs, caminhões, etc.) não de movimento contínuo como os “conveyors”. Este bloco deve ser sempre precedido de uma fila para armazenar as entidades que não conseguem alocar o transportador ocupado.

. **MOVE: NOME,DEST, VEL;** Bloco que modela o movimento dos transportadores intermitentes alocados pelos blocos “ALLOCATE” ou “REQUEST”. O parâmetro “NOME” identifica o transportador a ser movimentado; “DEST” o destino do transportador que se movimentará com um velocidade “VEL”. Esta velocidade, se não colocada, assume o valor definido no arquivo experimento.

. **FREE:NOME;** Bloco que modela a liberação de um transportador intermitente.

. **STATION, NOME:** Bloco que modela uma estação identificada por um “NOME”.

A combinação lógica dos blocos: QUEUE, ALLOCATE; MOVE; STATION; FREE, permitem modelar o movimento de transportadores, AGVs por exemplo, dentro do modelo de simulação.

. **BRANCH,MAX:**

**IF, CONDIÇÃO, LABEL:**

**WITH, PROB, LABEL:**

**ELSE, LABEL:**

**ALWAYS, LABEL;**

Bloco que permite reorientar o fluxo de entidade que flui pelo modelo. O parâmetro “MAX” indica o número de caminhos que podem ser tomados. Se a condição for satisfeita, a entidade é enviada para um outro bloco indicado por “LABEL”. Em um

conjunto de condições, se nenhuma delas for satisfeita, a entidade seleciona a opção "ELSE".

Se a opção for "WITH", a entidade será enviada para "LABEL" com uma probabilidade P. A opção "ALWAYS" indica que sempre uma entidade selecionará este caminho. Neste bloco, dois ou mais caminhos podem ser selecionados, sendo que é criada uma cópia da entidade que passa por este bloco e enviada para o "LABEL" do caminho selecionado.

. **COUNT:NOME,INCR;** Bloco que permite realizar uma contagem a cada vez que uma entidade flui por este bloco, com incrementos estabelecidos por "INCR". O "NOME" identifica o contador.

Semelhante ao arquivo modelo do SIMAN, o arquivo experimento também possui várias alternativas que possibilitam ao usuário executar uma série de experimentos de simulação. Entre os elementos principais temos:

- . **ATTRIBUTES;** Permite definir todos os atributos das entidades.
- . **VARIABLES;** Permite definir todas as variáveis utilizada no modelo.
- . **RESOURCES;** Permite definir todos os recursos do modelo, por exemplo, nome das máquinas, operadores, etc.
- . **QUEUES;** Permite definir todas as filas e as disciplinas.
- . **TRANSPORTERS;** Permite definir todos os transportadores.
- . **STATIONS;** Permite definir todas as estações do modelo.
- . **DSTATS;** É usado para obter estatísticas associadas com os recursos, transportes, variáveis, filas, etc.
- . **COUNTERS;** Define os contadores do modelo.

. **LINKS;** Permite definir todos os caminhos fixos dos AGVs, como distâncias, número de zonas de controle, velocidades, etc.

. **INTERSECTIONS;** Permite definir comprimento de cada ponto que conecta os caminhos e regra para acessar intersecção.

. **REPLICATE;** Permite definir o tempo de simulação, número de simulações, período de “warmup”, etc.

Por fim, o SIMAN possui um processador de saída que permite executar uma análise dos resultados coletados no fim da simulação. Comandos disponíveis como gráficos, histogramas, tabelas, intervalos de confiança, comparações de resultados, análise de variância, etc. permitem realizar uma melhor avaliação dos resultados obtidos. Além disso, procedimentos que permitem analisar sistemas não terminais também estão disponíveis, verificando a correlação dos dados através de correlogramas e “filtrando” os dados da simulação como forma de torná-los independentes entre si.

## 2. CINEMA

O CINEMA é um pacote gráfico que suporta um processo de animação dos modelos de simulação do SIMAN. Um modelo do SIMAN não exige a execução do CINEMA. Por outro lado, para a animação de um modelo no CINEMA, um modelo de simulação no SIMAN precisa ser escrito inicialmente [28].

Através do CINEMA, o “layout” do processo pode ser animado, permitindo a visualização de todos os componentes:

- Estático, representando a porção do “layout” que não sofre mudanças durante a animação, por exemplo, os caminhos dos transportadores, etc.;

- Dinâmico, representando a porção do “layout” que sofre mudanças durante a simulação. Todos os elementos dinâmicos do CINEMA estão necessariamente relacionados com os elementos definidos no SIMAN. Entre estes elementos que o CINEMA pode animar estão:

- . As entidades que fluem pelo modelo de simulação. A mudança de estado da entidade pode ser visualizada graficamente.

- . A fila animada no CINEMA está relacionada à fila definida no SIMAN.



. Recursos podem ter diferentes ícones representando seu estado corrente: ocupado, vazio ou desativado.

. Os transportadores (AGVs, “conveyors”, etc.). Semelhante aos recursos, os estados dos transportadores também podem ser identificados visualmente.

. Além destes elementos, o CINEMA permite a visualização de variáveis durante toda a execução do modelo.

Associados a estas características, estão um conjunto de alternativas que possibilitam controlar e monitorar todo o processo de simulação:

. A possibilidade de controlar a velocidade de execução e poder acompanhar determinados fenômenos com mais precisão.

. O estado da animação em determinado ponto do tempo poder ser salvo em um arquivo.

. Possibilidades de parar a execução em qualquer estágio do processo.

Este conjunto de alternativas tornam a animação de um modelo de simulação uma ferramenta importante no processo de verificação do modelo. Com estes recursos, uma execução detalhada de todo o modelo pode ser realizada e, erros na estrutura podem ser encontrados e corrigidos.

### 3. COMANDOS PARA DEPURAÇÃO DO MODELO

. **SET BREAK** : Comando que permite parar a execução da simulação em determinado bloco.

. **CANCEL BREAK**: Comando que cancela o “SET BREAK” anterior.

. **STEP**: Executa o modelo passo a passo.

. **GO**: Comando que inicia a simulação. Este comando pode ser utilizado em conjunto com o comando “UNTIL” permitindo a execução do modelo de simulação até determinado ponto do tempo.

. **ASSIGN**: Permite ao usuário ajustar valores de variáveis ou atributos da entidade que está em movimento.

. **NEXT**: Comando que permite reorientar o fluxo da entidade em movimento.

. **SHOW**: Comando que permite visualizar os estados das variáveis, recursos, filas, etc. do modelo.