

FABIANO LEAL

ANÁLISE DO EFEITO INTERATIVO DE FALHAS EM PROCESSOS DE  
MANUFATURA ATRAVÉS DE PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
do Campus de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Mecânica na área de  
Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Dagoberto Alves de  
Almeida (UNIFEI)

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto  
Silva Marins (UNESP-FEG)

Guaratinguetá  
2008

**"ANÁLISE DO EFEITO INTERATIVO DE FALHAS EM PROCESSOS DE  
MANUFATURA ATRAVÉS DE PROJETO DE EXPERIMENTOS  
SIMULADOS"**

**FABIANO LEAL**

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. DAGOBERTO ALVES DE ALMEIDA  
Orientador/UNIFEI

Prof. Dr. EDUARDO SALIBY  
COPPEAD/UFRJ

Prof. Dr. LEONARDO CHWIF  
SIMULATE

Prof. Dr. JOSÉ ARNALDO BARRA MONTEVECHI  
UNIFEI

Prof. Dr. VALÉRIO ANTÔNIO PAMPLONA SALOMON  
UNESP-FEG

Dezembro de 2008

## **DADOS CURRICULARES**

### **FABIANO LEAL**

NASCIMENTO	25.07.1978 – POÇOS DE CALDAS / MG
FILIAÇÃO	Maurilio Leal Sebastiana Bussolari Leal
1996/2000	Curso de Graduação Universidade Federal de Itajubá – Engenharia Mecânica
2001/2003	Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, nível de Mestrado, na Universidade Federal de Itajubá, MG.

## DEDICATÓRIA

de modo especial, à minha esposa Andreza, pelo apoio e incentivo, à meus pais e irmãos, pelos esforços investidos, e a todos aqueles que, de alguma forma, ajudaram-me na superação dos obstáculos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo trajeto percorrido em toda minha vida;

a meus pais e irmãos, pelos sacrifícios em benefício à educação e pelos incentivos ao longo da vida, e à minha esposa Andreza, pelo apoio e incentivo nos momentos bons e ruins, e pela paciência durante as fases de mestrado e doutorado;

aos professores da UNIFEI e UNESP que se dedicaram à concretização deste convênio de pesquisa, em especial ao Prof. José Arnaldo Barra Montevechi da Unifei e ao Prof. Fernando Augusto Silva Marins da Unesp;

ao meu orientador, Prof. Dagoberto Alves de Almeida, pela orientação, incentivo e confiança creditada em meu trabalho, desde o mestrado;

à empresa que acreditou no trabalho e abriu suas portas, à engenheira Ana Carolina, pela dedicação no pronto atendimento; ao gerente Marcos Santos, pelo apoio e espírito de pesquisador; ao engenheiro Adilson Matos, por me receber inicialmente na empresa e auxiliar na definição do problema;

ao amigo e companheiro de trabalho Alexandre Pinho, pela troca de idéias fundamentais a este trabalho, e pelo apoio no cumprimento de créditos, fase marcada por cansativas mas divertidas viagens. Nesta fase de créditos, vale um agradecimento especial ao professor Messias Borges Silva, pelas excelentes aulas de DOE;

ao amigo e aluno Rafael Florêncio, pela imensa ajuda durante a fase de modelagem e pelas ricas discussões a respeito de simulação e DOE;

aos professores e alunos integrantes do NEAAD, pelo apoio e sugestões durante as etapas do doutoramento, em especial aos professores José Arnaldo, Anderson e Pedro Paulo, e às alunas Mona Liza Moura de Oliveira e Fabiana Dias Batista;

ao engenheiro Vinícius Pelúcio Scaff, da Belge Engenharia e Sistemas, representante do *software* Promodel, pela ajuda técnica e pela amizade;

a todos da Unifei que de alguma forma contribuíram com este trabalho;

a empresa Padtec, pelo apoio à pesquisa científica.

## EPÍGRAFE

“Eu poderia viver recluso numa casca de noz e me  
considerar rei do espaço infinito.”

Shakespeare, Hamlet, Ato 2, Cena 2.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

## **RESUMO**

Em vários problemas relacionados à análise de falhas em processos de manufatura, os efeitos das falhas são analisados de forma independente. Porém, em alguns sistemas, as falhas podem apresentar um efeito de interação. Se este efeito interativo for ignorado, o risco da falha também será subestimado. Deste modo, este trabalho objetivou analisar o efeito interativo de falhas em processos através de projeto de experimentos simulados. Para esta análise, realizou-se uma modelagem conceitual do processo e das falhas, através da técnica desenvolvida e nomeada de IDEF-SIM. Os experimentos simulados foram delineados, a fim de se verificar os efeitos principais dos modos de falha e de suas interações. Dois objetos de estudo do setor de autopeças foram escolhidos para esta pesquisa. Concluiu-se o trabalho com a hierarquização dos modos de falha e interações de acordo com o impacto na produção. Esta hierarquização foi apresentada segundo os efeitos locais e globais do modo de falha, através da apresentação de seis cenários. Desta forma, definem-se como principais aspectos originais deste trabalho: a determinação do efeito interativo de falhas em processos através do projeto de experimentos simulados e a modelagem conceitual de processos e falhas para a simulação, através de uma técnica proposta, o IDEF-SIM.

**PALAVRAS-CHAVE:** Interação de falhas, simulação a eventos discretos, projeto de experimentos, IDEF-SIM.

LEAL, F. **Failures interactive effect analysis in manufacturing processes by means of the design of simulated experiments**. 2008. 237 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

### **ABSTRACT**

In several problems related to failures analysis in manufacturing processes, their effects are analyzed in an independent way. Even so, in some systems, the failures can present an interactive effect. If this interactive effect is ignored, the risk of the failure will also be underestimated. In this way, this work aims to analyze the failures interactive effect in processes through design of simulated experiments. For this analysis, a conceptual modeling was used to model processes and failures, through a proposed technique named IDEF-SIM. The simulated experiments were designed in order to verify the main effects of the failures modes and their interactions. Two studies from the automotive industry were chosen for this research. This work was concluded by ranking the failures modes and interactions, in accordance with the production impact. This hierarchization was presented according to the local and global effects of the failures modes by means of six sceneries. In this manner, the main original aspects of this work is defined as the determination of failures interactive effect in processes through the design of simulated experiments and the conceptual modeling for simulation of processes and failures through the proposed IDEF-SIM technique.

**KEYWORDS:** Interaction failures, discrete event simulation, design of experiments, IDEF-SIM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Análise de falhas de forma independente .....	24
Figura 1.2 – Análise de falhas de forma dependente .....	24
Figura 1.3 - Modelo conceitual do sistema hipotético .....	26
Figura 1.4 – Estrutura básica da técnica de modelagem IDEF0 .....	32
Figura 1.5 – Etapas a serem cumpridas no trabalho, representadas através da técnica IDEF0.....	33
Figura 1.6 – Classificações da pesquisa .....	36
Figura 2.1 – Modelo de simulação transformando <i>inputs</i> em <i>outputs</i> .....	40
Figura 2.2 – Entrada de valores determinísticos, gerando resultados determinísticos (DIDO).....	41
Figura 2.3 – Entrada de valores aleatórios, gerando resultados aleatórios (RIRO) .....	41
Figura 2.4 – Seqüência de passos para a simulação, segundo Chwif.....	42
Figura 2.5 – Seqüência de passos para a simulação, segundo Montevechi .....	43
Figura 2.6 – A verificação e validação em um projeto de simulação. ....	47
Figura 2.7 – Procedimentos e testes estatísticos para validação de modelos de simulação.....	59
Figura 3.1 – Aplicação de fluxograma .....	68
Figura 3.2 – Setas de relacionamento com as funções, segundo as regras do IDEF0...72	
Figura 3.3 – Saídas gerando entradas e controles, no IDEF0.....	73
Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do IDEF0 .....	73
Figura 3.5 – Junções lógicas do IDEF3.....	74
Figura 3.6 – Exemplo de aplicação do IDEF3 .....	75
Figura 3.7 – IDEF3 no modo de descrição das transições .....	75
Figura 3.8 – Uso do DFD sobre o mesmo processo representado na Figura 3.1 .....	77
Figura 4.1 – Passos propostos para a realização de um projeto de experimentos.....	83
Figura 4.2 – Fatores controláveis e incontroláveis, afetando o processo.....	88
Figura 4.3 – Projeto fatorial $2^k$ . ....	91

Figura 5.1 – Histograma dos possíveis valores do RPN gerados a partir de todas as possíveis combinações de $S_f$ , $S$ e $S_d$ .....	105
Figura 5.2 – Exemplo de aplicação da FTA.....	109
Figura 6.1 – O anel de compressão: produto do processo considerado .....	117
Figura 6.2 – Representação visual do sistema hipotético de manufatura a ser modelado. ....	122
Figura 6.3 - Modelo conceitual do sistema hipotético de manufatura através do IDEF-SIM. ....	123
Figura 6.4 – Conversão do IDEF-SIM em modelo computacional, através do <i>software</i> Promodel®. ....	125
Figura 6.5 – Modelo conceitual do primeiro objeto de estudo.....	127
Figura 6.6 – Tela do modelo computacional do primeiro objeto de estudo.....	130
Figura 6.7 – Sinalizador demonstrando o estado da máquina.....	133
Figura 6.8 – Fluxograma utilizado para validação estatística dos modelos. ....	134
Figura 6.9 – Teste de normalidade, realizado no Minitab, para o conjunto de dados gerados na simulação do primeiro objeto de estudo. ....	136
Figura 6.10 – Teste de normalidade, realizada no Minitab, para o conjunto de dados do sistema real do primeiro objeto de estudo. ....	136
Figura 6.11 – Verificação da não igualdade de variâncias, pelo software Minitab, entre o conjunto de dados reais e simulados do primeiro objeto de estudo. ....	138
Figura 6.12 – Teste $t$ no software Minitab, assumindo a não igualdade entre as variâncias dos conjuntos. ....	138
Figura 6.13 – Resultado final do teste $t$ no Minitab, para os conjuntos de dados simulados e reais, do primeiro objeto de estudo. ....	139
Figura 6.14 – Utilização do conceito de modo de falha. ....	140
Figura 6.15 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência não justificada do operador”.....	142
Figura 6.16 – Distribuições candidatas apontadas pelo Minitab, aos dados do modo de falha “Ausência não justificada do operador”.....	142

Figura 6.17 – Distribuições candidatas apontadas pelo Stat:Fit, aos dados do modo de falha “Ausência não justificada do operador” .....	143
Figura 6.18 – Não rejeição da distribuição lognormal para representação dos dados da “Ausência não justificada do operador” .....	144
Figura 6.19 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência justificada do operador” .....	145
Figura 6.20 – Não rejeição da distribuição lognormal para representação dos dados da “Ausência justificada do operador”, segundo o Stat:Fit. ....	146
Figura 6.21 – Pontos de programação dos efeitos dos modos de falha referentes ao primeiro objeto de estudo (MF = modo de falha). ....	148
Figura 6.22 – Ação dos modos de falha sobre o modelo de simulação do primeiro objeto de estudo.....	149
Figura 6.23 – Exemplo de ativação dos modos de falha no modelo computacional ..	149
Figura 6.24 – Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 1 do primeiro objeto de estudo. ....	151
Figura 6.25 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 1, referente ao primeiro objeto de estudo.....	153
Figura 6.26 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 1, referente ao primeiro objeto de estudo.....	154
Figura 6.27 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pela máquina 2_4. ....	155
Figura 6.28 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela máquina 2_4.....	156
Figura 6.29 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela máquina 2_4.....	157
Figura 6.30 – Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 2 do primeiro objeto de estudo. ....	161
Figura 6.31 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 2, referente ao primeiro objeto de estudo.....	164
Figura 6.32 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 2, referente ao primeiro objeto de estudo.....	164

Figura 6.33 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pela célula.....	165
Figura 6.34 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela célula. ....	166
Figura 6.35 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela célula. ....	166
Figura 6.36 – Resumo dos resultados encontrados no primeiro objeto de estudo .....	168
Figura 6.37 – Primeira parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	169
Figura 6.38 – Segunda parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	170
Figura 6.39 – Terceira parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	170
Figura 6.40 – Quarta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	171
Figura 6.41 – Quinta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	171
Figura 6.42 – Sexta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.....	172
Figura 6.43 – Modelo computacional do segundo objeto de estudo, através do <i>software</i> Promodel®. ....	173
Figura 6.44 – Teste de Mann-Whitney realizado através do <i>software</i> Minitab®. ....	173
Figura 6.45 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência do operador” .....	175
Figura 6.46 – Não rejeição da distribuição beta para representação dos dados da “Ausência do operador”, segundo o Stat:Fit.....	176
Figura 6.47 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Quebra de máquina”. ....	178
Figura 6.48 – Ação dos modos de falha sobre o modelo de simulação do segundo objeto de estudo.....	180

Figura 6.49 - Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 1 do segundo objeto de estudo.....	181
Figura 6.50 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 1, referente ao segundo objeto de estudo. ....	183
Figura 6.51 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 1, referente ao segundo objeto de estudo.....	184
Figura 6.52 – Efeito dos modos de falha sobre o número de peças produzidas pela lapidadora 2_1.....	184
Figura 6.53 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela lapidadora 2_1.....	185
Figura 6.54 – Vértices do cubo com os valores da média do número de peças produzidas pela lapidadora 2_1, sob ação dos modos de falha.....	186
Figura 6.55 - Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 2 do segundo objeto de estudo. ....	187
Figura 6.56 - Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 2 do segundo objeto de estudo.....	187
Figura 6.57 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 2, referente ao segundo objeto de estudo. ....	189
Figura 6.58 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 2, referente ao segundo objeto de estudo.....	189
Figura 6.59 – Efeito dos modos de falha sobre o número de peças produzidas pela retificadora 2_1. ....	190
Figura 6.60 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela retificadora 2_1. ....	191
Figura 6.61 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas retificadora 2_1.....	192
Figura 6.62 – Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo. ....	195
Figura 6.63 – Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo. ....	195

Figura 6.64 – Terceira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo. ....	196
Figura 6.65 – Quarta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta Y no cenário 3 do segundo objeto de estudo. ....	196
Figura 6.66 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 3, referente ao segundo objeto de estudo. ....	199
Figura 6.67 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 3, referente ao segundo objeto de estudo.....	199
Figura 6.68 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pela célula 2.....	200
Figura 6.69 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela célula 2. O valor 1,96 marca o limite de significância.....	200
Figura 6.70 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela célula 2. ....	201
Figura 6.71 – Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo. ....	202
Figura 6.72 – Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo. ....	203
Figura 6.73 – Terceira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo. ....	203
Figura 6.74 – Quarta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo. ....	204
Figura 6.75 – Quinta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta Y no cenário 4 do segundo objeto de estudo. ....	204
Figura 6.76 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 4, referente ao segundo objeto de estudo .....	207
Figura 6.77 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 4, referente ao segundo objeto de estudo.....	207

Figura 6.78 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pelas células 1 e 2.....	208
Figura 6.79 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pelas células 1 e 2.....	209
Figura 6.80 - Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pelas células 1 e 2.....	209
Figura 6.81 – Efeitos dos modos de falha e interações dos quatro cenários analisados no segundo objeto de estudo .....	210

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Matriz experimental 2 <sup>4</sup> , para as falhas A, B, C e D.....	27
Tabela 1.2 – Efeito sobre a variável de resposta dos fatores principais e suas interações, e o valor de t para cada efeito. ....	28
Tabela 2.1 – Funções para transformação da distribuição discreta em contínua. ....	58
Tabela 3.1 – Simbologia utilizadas no ACD.....	69
Tabela 5.1 - Critério de análise e sistema de ordenação para a ocorrência da falha. ...	102
Tabela 5.2 - Critério de análise e sistema de ordenação para a detecção da causa da falha.....	102
Tabela 5.3 - Critério de análise e sistema de ordenação para a severidade dos efeitos da falha. ....	102
Tabela 6.1 - Simbologia utilizada na técnica proposta IDEF-SIM .....	120
Tabela 6.2 – Entidades e funções presentes na Figura 6.3 .....	123
Tabela 6.3 – Precisão obtida com 10 replicações no primeiro objeto de estudo.....	132
Tabela 6.4 – Número de peças produzidas no primeiro objeto de estudo, simulado e real.....	135
Tabela 6.5 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha A.....	141
Tabela 6.6 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B.....	145
Tabela 6.7 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha C. ....	146
Tabela 6.8 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha D. ....	147
Tabela 6.9 – Definição do cenário 1 .....	151
Tabela 6.10 – Níveis e fatores considerados no projeto experimental.....	152
Tabela 6.11 – Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa...	152
Tabela 6.12 – Caracterização do fator ocorrência no cenário 2. ....	158
Tabela 6.13 – Equalização das ocorrências.....	160
Tabela 6.14 - Definição do cenário 2 .....	160
Tabela 6.15 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental. ....	162
Tabela 6.16 – Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa...	163
Tabela 6.17 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha A. ....	175

Tabela 6.18 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B (máquina retificadora). .....	177
Tabela 6.19 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B (máquina lapidadora). .....	177
Tabela 6.20 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha C. ....	177
Tabela 6.21 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha D (máquina retificadora). .....	179
Tabela 6.22 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha D (máquina lapidadora). .....	179
Tabela 6.23 - Definição do cenário 1. ....	182
Tabela 6.24 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental. ....	182
Tabela 6.25 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa....	183
Tabela 6.26 - Definição do cenário 2 .....	187
Tabela 6.27 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental. ....	188
Tabela 6.28 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa....	188
Tabela 6.29 – Caracterização da ocorrência de cada modo de falha (MF) no cenário 3, de acordo com os dados coletados. ....	193
Tabela 6.30 – Equalização das ocorrências. ....	194
Tabela 6.31 - Definição do cenário 3 .....	194
Tabela 6.32 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental.....	197
Tabela 6.33 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa....	198
Tabela 6.34 - Definição do cenário 4 .....	202
Tabela 6.35 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental.....	205
Tabela 6.36 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa....	206

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACD	- Activity Cycle Diagram
AHP	- Analytic Hierarchy Process
BPM	- Business Process Modeling
BPS	- Business Process Simulation
CCF	- Common Cause Failures
DF	- Dependent Failures
DFD	- Data Flow Diagrams
DIDO	- Deterministic in, deterministic out
DOE	- Design of Experiments
EXP	- Experimento
FMEA	- Failure mode and effects analysis
FMECA	- Failure mode, effects and criticality analysis
FTA	- Fault Tree Analysis
GIGO	- Garbage in garbage out
IDEF	- Integrated definition methods
LIFO	- Last in first out
MF	- Modo de falha
MTBF	- Mean time between failures
MTTF	- Mean time to failure
MTTR	- Mean time to repair
NIST	- National Institute of Standards and Technology
OP	- Operador
RIRO	- Random in random out
RPN	- Risk priority number
SADT	- Structured Analysis and Design Technique
TBF	- Time between failures
TMEF	- Tempo médio entre falhas
UML	- Unified modeling language
UOB	- Unit of Behavior
V&V	- Verificação e validação

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	22
1.1 O PROBLEMA DA PESQUISA.....	22
1.2 OBJETIVOS E SUAS JUSTIFICATIVAS.....	25
1.2.1 <b>Objetivo Principal e Justificativas</b> .....	25
1.2.2 <b>Objetivos Específicos e Justificativas</b> .....	31
1.3 ESQUEMATIZAÇÃO DA PROPOSTA.....	32
1.4 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E CONTRIBUIÇÕES.....	34
1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	35
1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	38
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	38
<b>CAPÍTULO 2 – SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS</b> .....	39
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	39
2.2 ETAPAS SUGERIDAS PARA A SIMULAÇÃO.....	42
2.2.1 <b>Modelo Conceitual</b> .....	44
2.2.2 <b>Modelagem dos dados de entrada</b> .....	45
2.2.3 <b>Implementação computacional</b> .....	46
2.2.4 <b>Verificação e validação de modelos</b> .....	47
2.2.4.1 Técnicas para verificação de modelos.....	49
2.2.4.2 Técnicas para validação de modelos.....	51
2.2.5 <b>Execução do modelo operacional</b> .....	58
2.2.6 <b>Projetos de experimentos</b> .....	62
2.3 PESQUISAS EM SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS.....	62
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	64
<b>CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DE PROCESSOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MAPEAMENTO</b> .....	65
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
3.2 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DE PROCESSOS.....	67
3.2.1 <b>Fluxograma</b> .....	68
3.2.2 <b>ACD (activity cycle diagram)</b> .....	69
3.2.3 <b>IDEF (integrated definition methods)</b> .....	70
3.2.3.1 <b>IDEF0 (integration definition language 0)</b> .....	71
3.2.3.2 <b>IDEF3</b> .....	73
3.2.3.3 Outras técnicas da família IDEF.....	76
3.2.4 <b>DFD (data flow diagrams)</b> .....	76
3.2.5 <b>UML (unified modeling language)</b> .....	78
3.3 PESQUISAS EM TÉCNICAS DE MODELAGEM/MAPEAMENTO.....	78
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	80
<b>CAPÍTULO 4 – PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS</b> .....	82
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	82
4.2 O DOE NA SIMULAÇÃO.....	84
4.3 CONCEITOS UTILIZADOS EM EXPERIMENTOS SIMULADOS.....	85
4.3.1 <b>Replicação e Repetição</b> .....	86
4.3.2 <b>Aleatorização</b> .....	86

4.3.3 Fatores e níveis.....	87
4.3.4 Resposta.....	89
4.3.5 Efeito.....	89
4.3.6 Interação.....	90
4.4 PROJETOS FATORIAIS.....	90
4.5 ADEQUABILIDADE DO MODELO.....	92
4.6 PESQUISAS EM PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS.....	93
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	94
<b>CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE FALHAS.....</b>	<b>96</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	96
5.2 ALGUNS CONCEITOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE FALHAS.....	97
5.3 MODELOS PARA ANÁLISE DE FALHAS.....	99
5.3.1 FMEA ( <i>failure mode and effects analysis</i> ).....	100
5.3.1.1 Críticas e melhorias à FMEA.....	104
5.3.2 FMECA ( <i>failure mode, effects and criticality analysis</i> ).....	106
5.3.3 FTA ( <i>fault tree analysis</i> ).....	107
5.4 FALHAS DEPENDENTES.....	110
5.5 PESQUISAS EM SIMULAÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO E FALHAS.....	113
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	115
<b>CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO PRÁTICA.....</b>	<b>116</b>
6.1 APRESENTAÇÕES DOS OBJETOS DE ESTUDO.....	116
6.2 TÉCNICA DE MODELAGEM DESENVOLVIDA: O IDEF-SIM.....	119
6.3 PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO.....	126
6.3.1 Modelo conceitual.....	126
6.3.2 Modelagem dos dados de entrada.....	128
6.3.3 Implementação do modelo computacional.....	129
6.3.4 Verificação do modelo computacional.....	132
6.3.5 Validação do modelo computacional.....	133
6.3.6 Modelagem dos modos de falha.....	139
6.3.7 Programação dos efeitos dos modos de falha.....	147
6.3.8 Análise do cenário 1.....	150
6.3.9 Análise do cenário 2.....	158
6.3.10 Síntese dos resultados do primeiro objeto de estudo.....	167
6.4 SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO.....	168
6.4.1 Modelo conceitual.....	169
6.4.2 Modelagem dos dados de entrada, implementação, verificação e validação do modelo computacional.....	172
6.4.3 Modelagem dos modos de falha.....	174
6.4.4 Programação dos efeitos dos modos de falha.....	179
6.4.5 Análise do cenário 1.....	181
6.4.6 Análise do cenário 2.....	186
6.4.7 Análise do cenário 3.....	193
6.4.8 Análise do cenário 4.....	202
6.4.9 Síntese dos resultados do segundo objeto de estudo.....	210

<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES</b> .....	211
7.1 CONCLUSÕES DOS OBJETIVOS PROPOSTOS.....	211
7.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO PRÁTICA DESTA PROPOSTA .....	215
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	216
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	218
<b>APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES ORIGINADAS</b> .....	235

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo irá detalhar o problema da pesquisa. Dentro deste problema, algumas perguntas serão formuladas. A seguir, serão anunciados o objetivo principal e os objetivos específicos. Cada um deles será justificado quanto a sua importância, procurando ressaltar as contribuições originais.

O capítulo ainda apresenta uma esquematização do trabalho, apontando as etapas a serem cumpridas. A relevância científica e as principais contribuições esperadas neste trabalho serão descritas, seguidas de uma caracterização metodológica da pesquisa. O capítulo finaliza com as limitações esperadas do trabalho e a estrutura dos demais capítulos.

### 1.1 O PROBLEMA DA PESQUISA

Em sistemas de produção é comum encontrar-se políticas específicas para o controle de falhas. Estas falhas podem surgir no produto final, afetando seu desempenho e podendo levar o cliente final a um estado de frustração. Além disto, as falhas podem ocorrer no processo, causando o desperdício de materiais, diminuindo a taxa de produção, aumentando o *lead time*, encarecendo desnecessariamente o processo produtivo, entre outros efeitos.

A fim de se eliminar ou diminuir a ação destas falhas, diversas informações são necessárias, na busca do conhecimento deste evento indesejado. Alguns exemplos de informações necessárias são a taxa de falhas, o tempo médio entre falhas, o tempo médio de reparo, o efeito destas falhas, as causas destas falhas, entre outras.

Mas como é possível avaliar, ou mesmo mensurar, o efeito de uma falha sobre um processo? Entre um grupo de  $n$  falhas, qual a considerada mais severa a um processo? No ambiente industrial, se popularizou o uso de uma técnica denominada de FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), onde a gravidade do efeito de uma falha é avaliada segundo uma escala de dez pontos, indo de um efeito sem conseqüências, até um efeito com conseqüências consideradas perigosas (STAMATIS, 2003).

Porém, a determinação desta pontuação na escala é feita de forma subjetiva, através de reuniões entre os especialistas do processo. Pode-se encontrar na escala os termos “efeito desprezível” e “efeito muito desprezível”, o que gera confusão na seleção do valor. Surge então a primeira pergunta desta pesquisa:

- como avaliar o efeito de uma falha de forma quantitativa?

Entretanto, outro problema aparece. Tomam-se como exemplo hipotético duas falhas de processo reconhecidas por uma empresa: falha 1 e falha 2. Imaginando que a empresa esteja focando a diminuição de refugo, qual destas falhas deve ser “atacada” primeiro? Caso o foco seja a diminuição do *lead time* dos lotes, qual destas falhas mais contribui com o aumento do *lead time*?

Esta questão ainda pode ser justificada pela seguinte situação: uma célula com  $n$  postos de trabalho apresenta uma determinada falha  $f$ . Um grupo de especialistas pode definir que, esta falha  $f$ , possui um grave efeito, quando considerado o número de peças produzidas pelo posto de trabalho afetado por esta falha. Mas, considerando agora o número de peças produzidas por toda a célula, a falha  $f$  ainda deve ser considerada grave?

Esta dúvida irá completar a primeira pergunta desta pesquisa:

- como avaliar o efeito de uma falha de forma quantitativa, de acordo com uma determinada variável de saída do processo?

Ainda tomando como exemplo a situação hipotética criada, como avaliar o efeito combinado destas falhas? Pode-se citar que a FMEA não considera o efeito combinado de falhas. Surge, desta forma, a segunda pergunta desta pesquisa:

- como avaliar o efeito da interação de falhas sobre uma variável de saída de um processo?

Para ilustrar este problema utiliza-se a Figura 1.1. Nesta figura, observa-se a falha 1 sendo gerada pelas causas 1 ou 2. Uma vez gerada, a falha 1 provoca no sistema alguns efeitos, nomeados de “Efeitos da falha 1”. De forma independente à falha 1, observa-se que a falha 2 é gerada pelas causas 3 e 4. Uma vez gerada, a falha 2 provoca no sistema alguns efeitos, nomeados de “Efeitos da falha 2”.

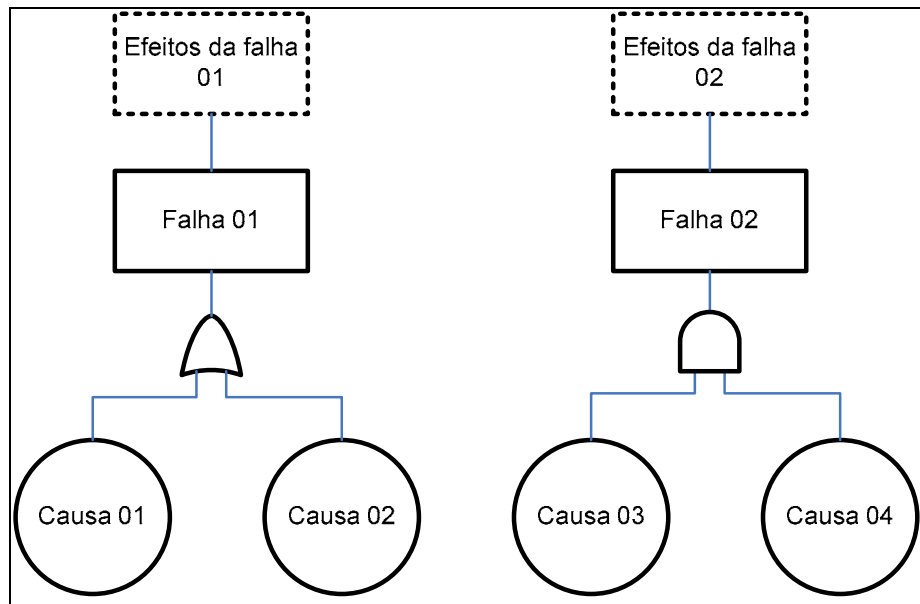


Figura 1.1 – Análise de falhas de forma independente

O foco central deste trabalho está na análise do efeito combinado (interação) destas falhas, como mostra a Figura 1.2.

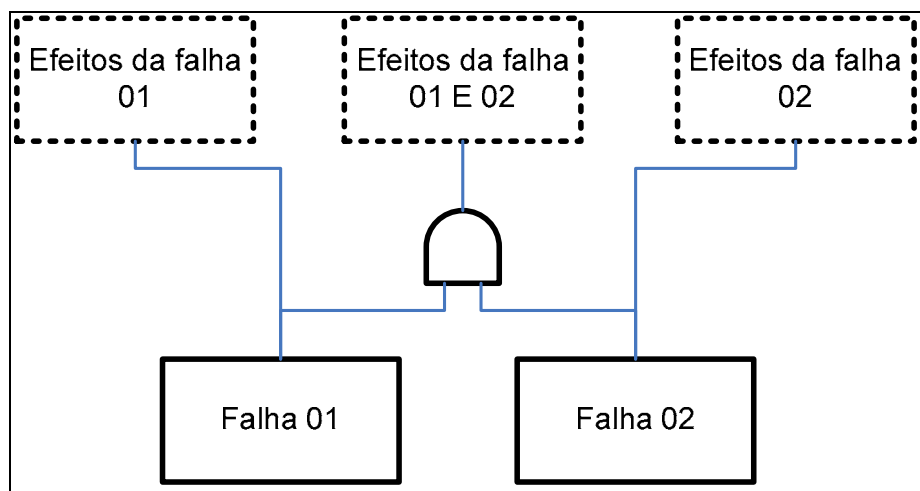


Figura 1.2 – Análise de falhas de forma dependente

Uma vez definido o problema, pode-se justificar o motivo da escolha deste tema. Utilizando uma definição de Barros e Lehfeld (1999), a definição do tema pode surgir com base na observação do cotidiano, na vida profissional, em programas de pesquisa, em contatos e relacionamentos com especialistas, no *feedback* de pesquisas já realizadas e em estudo da literatura especializada.

Pode-se dizer que este somatório de fatores influenciou na escolha do tema. A participação em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), especificamente na análise de falhas em empresas distribuidoras de energia elétrica (projetos estes supervisionados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL), possibilitou a percepção da não consideração prática da interação de falhas. O contato com especialistas nas áreas de manutenção, simulação a eventos discretos e projeto de experimentos também se mostrou favorável ao desenvolvimento desta tese.

## 1.2 OBJETIVOS E SUAS JUSTIFICATIVAS

Este item do Capítulo 1 irá apresentar o objetivo principal da pesquisa e os objetivos específicos. Para cada objetivo serão apresentadas justificativas de sua importância e das técnicas escolhidas.

### 1.2.1 Objetivo Principal e Justificativas

O objetivo principal deste trabalho é:

- analisar o efeito interativo de falhas em processos, de forma quantitativa, através de projeto de experimentos simulados.

Esta pesquisa define o efeito de uma falha de forma análoga à definição de efeito utilizada em pesquisas de projeto de experimentos. Ou seja, o efeito de uma falha é considerado uma alteração em uma variável de resposta do processo, produzida pela

ocorrência da falha. A interação ocorre quando as falhas apresentam algum tipo de sinergia.

Para avaliar a aplicação do projeto de experimentos simulados neste problema, foi desenvolvido um sistema hipotético, construído a partir de dados de outras pesquisas já realizadas pelo grupo de pesquisa a qual se insere o autor. Vale destacar que o exemplo a seguir não faz parte dos objetos de estudo desta tese, mas sim um protótipo para apresentar a idéia central.

O sistema hipotético é composto por quatro postos de trabalho, organizados em um arranjo físico linear, como mostra a Figura 1.3. O fluxo foi considerado contínuo, peça a peça. A variável de saída analisada foi o número de peças produzidas (aprovadas no teste de qualidade) em um período de oito horas de trabalho.

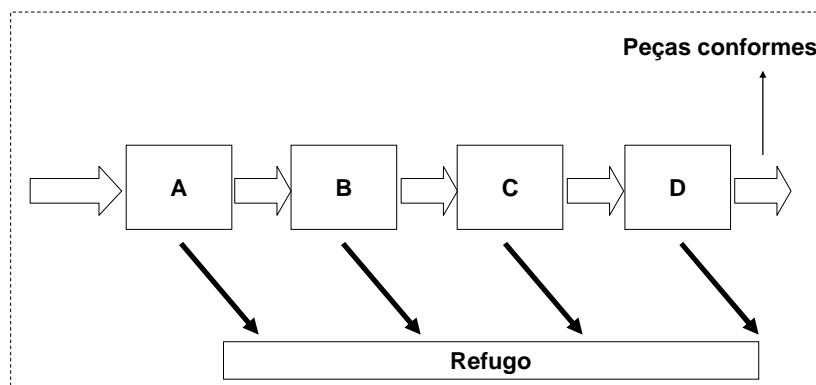


Figura 1.3 - Modelo conceitual do sistema hipotético

Três variáveis de entrada foram determinadas: tempo de operação por peça produzida de cada posto de trabalho (estocástico), índice de refugo de cada posto de trabalho (determinístico) e taxa de abastecimento do posto A (determinístico).

Foram consideradas quatro falhas neste sistema:

- a) falha A: aumento para 30% do número de refugos no posto A e diminuição da taxa de abastecimento;
- b) falha B: aumento para 15% do número de refugos e aumento do tempo de operação do posto A;
- c) falha C: paralisação da operação do posto C em 60 minutos;

- d) falha D: aumento do tempo de operação do posto D e geração de 20% de refugos.

Cada falha foi considerada como um fator de dois níveis, onde o nível (-) a falha não ocorre e o nível (+) representa a ocorrência da falha. A Tabela 1.1 representa a matriz experimental do projeto fatorial completo  $2^k$ , onde  $k$  é igual a quatro. Foram realizadas três réplicas para cada experimento, sendo mensurado o número de peças conformes.

Tabela 1.1 – Matriz experimental  $2^4$ , para as falhas A, B, C e D.

Exp	A	B	C	D	Peças conformes				
					rep 1	rep 2	rep 3	Y médio	Variância
1	-	-	-	-	28	26	26	26,67	1,33
2	+	-	-	-	26	24	23	24,33	2,33
3	-	+	-	-	22	22	21	21,67	0,33
4	+	+	-	-	13	14	12	13,00	1,00
5	-	-	+	-	23	23	23	23,00	0,00
6	+	-	+	-	20	18	23	20,33	6,33
7	-	+	+	-	21	19	16	18,67	6,33
8	+	+	+	-	14	13	12	13,00	1,00
9	-	-	-	+	21	21	22	21,33	0,33
10	+	-	-	+	22	21	23	22,00	1,00
11	-	+	-	+	18	20	17	18,33	2,33
12	+	+	-	+	8	9	11	9,33	2,33
13	-	-	+	+	19	25	18	20,67	14,33
14	+	-	+	+	20	21	21	20,67	0,33
15	-	+	+	+	18	16	15	16,33	2,33
16	+	+	+	+	10	10	10	10,00	0,00

Após a determinação dos efeitos principais e combinados de cada fator, realizou-se um teste  $t$  para verificar a significância destes efeitos. Considerando um grau de confiança de 95%, e trabalhando com 32 graus de liberdade, tem-se da tabela  $t$  de *Student* (TRIOLA, 2005) que  $t_{\text{crítico}} = 1,69$ . Considera-se então que, para  $t \geq t_{\text{crítico}}$ , o efeito é significativo para a confiança adotada.

A Tabela 1.2 demonstra os efeitos calculados e o valor de  $t$  para cada efeito. Pode-se então hierarquizar as falhas A, B, C e D, de acordo com o efeito na variável “número de peças produzidas”, da seguinte forma: B, A, D e C. A falha C não causa efeito significativo sobre o número de peças produzidas. A interação das falhas A e B possui um efeito significativo.

Tabela 1.2 – Efeito sobre a variável de resposta dos fatores principais e suas interações, e o valor de t para cada efeito.

1ª ordem	Efeito	t	3ª ordem	Efeito	t
A	-4,25	2,633	ABC	0,83	0,516
B	-7,33	4,544	ABD	-0,83	0,516
C	-1,75	1,084	ACD	-0,08	0,051
D	-2,75	1,704	BCD	-0,5	0,309
2ª ordem	Efeito	t	4ª ordem	Efeito	t
AB	-3,17	1,962	ABCD	0,00	0,000
AC	0,58	0,361			
AD	0,58	0,361			
BC	0,67	0,413			
BD	-0,33	0,206			
CD	0,92	0,568			

Como o efeito de cada fator é calculado através da diferença entre a média dos resultados da variável de resposta quando o fator está no nível (+) e (-), nesta ordem, pode-se concluir que para efeitos negativos, o nível (-) demonstrou maiores valores da variável de resposta, comparando-se ao nível (+). Ou seja, na ocorrência da falha (nível +), o número de peças produzidas diminui. Esta proposta inicial da tese, utilizando um caso hipotético, é encontrada em Leal *et al.* (2007).

Embora represente um sistema simples, este exemplo já aponta a possibilidade real de obtenção dos resultados estipulados no objetivo principal desta tese.

Esta análise ocorrerá na prática em dois processos de uma empresa do setor de autopeças. Estes dois processos, a serem descritos posteriormente, possuem uma diferença quanto à análise de falhas: um deles é pouco afetado por falhas no processo, devido a um rigoroso controle e pelas próprias características do processo. O outro possui uma diversidade maior de falhas e está mais sujeito aos seus efeitos, devido a características do processo. Nestes dois processos existem operações automáticas e manuais.

Mas por que o uso do projeto de experimentos simulados? Para responder esta questão, a pergunta será dividida em duas partes:

- Por que utilizar a simulação?
- Por que utilizar o projeto experimental?

Autores como Hernandez-Matias *et al.* (2008) salientam que a alta competitividade das modernas indústrias leva as empresas a um contínuo refinamento de seus processos de manufatura. O estudo de tempos e movimentos e programas de melhoria da qualidade são ferramentas úteis no estudo de sistemas de manufatura. Porém, o grande número de estratégias, técnicas e métodos que podem ser implementados faz com que a análise destes sistemas se torne algo difícil. As razões desta dificuldade estão voltadas à complexidade dos sistemas de manufatura e ao alto número de fatores envolvidos. Em muitos casos os resultados obtidos em análises convencionais deixam uma lacuna na descrição destes sistemas. Cresce, desta forma, a procura pela simulação computacional.

Para se avaliar o efeito de uma falha sobre uma variável de saída de um determinado processo torna-se necessário gerar um modelo, que represente de forma aceitável o processo real. Porém, a complexidade dos processos de manufatura impõe ao modelador a necessidade de se incluir várias variáveis, como tempo de operação das máquinas, paradas programadas, *setups*, estoques intermediários, tempos de deslocamentos, porcentagem de refugo e/ou retrabalho, tempos de esperas, entre outras. O agravante é que estas variáveis assumem, na maioria dos casos, um comportamento estocástico. Este tipo de problema é indicado ao uso da simulação computacional.

Além disto, para a análise do efeito da falha, não é economicamente viável induzir a ocorrência da falha no processo. Este fato também justifica o uso da simulação computacional.

Uma vez que o modelo de simulação esteja pronto (verificado e validado), uma série de experimentos pode ser realizada.

O uso de técnicas de projeto experimental, ou projeto de experimentos, permite a análise do efeito de fatores sobre variáveis de saída do modelo. Entende-se, portanto, que o projeto de experimentos simulados pode atender às necessidades desta pesquisa.

Como foi apresentado anteriormente, uma das formas mais utilizadas para se analisar as falhas é a FMEA. Segundo Price e Taylor (2002), em geral considera-se as falhas no sistema de forma isolada. A consideração de todas as possíveis combinações

de falhas é impraticável. Na maior parte das vezes, somente os efeitos isolados das falhas são considerados.

Em sua pesquisa, Price e Taylor (2002) apontaram algumas falhas em circuitos eletrônicos, descrevendo para estas falhas seu modo, efeito, além dos parâmetros severidade, ocorrência e detecção. O critério para seleção das falhas foi de acordo com a probabilidade de ocorrência. Estas foram simuladas em um simulador de circuitos eletrônicos. Pode-se notar, neste caso, a preocupação dos autores em analisarem os efeitos das falhas não de forma isolada. Os autores discutiram esta questão, utilizando como caso prático um circuito eletrônico, porém não trabalhando com a questão da interação.

Em alguns sistemas, falhas em certos componentes podem interagir entre si, e gerar efeitos advindos desta interação. Estas falhas são definidas como falhas interativas e ocorrem principalmente em sistemas mecânicos. Se este efeito interativo for ignorado, o risco da falha será subestimado. Entretanto, como afirmam os autores Sun *et al.* (2006, p.495, grifo do autor), em se tratando do assunto interação de falhas, “(...) a literatura é **silenciosa** em pesquisas que explorem este campo”. Esta afirmação de Sun *et al.* (2006) vem reforçar a proposta deste trabalho.

Dois anos depois, os autores Sun, Ma e Mathew (2008), pesquisando a programação da manutenção em cenários com interação de falhas, afirmaram que pesquisas envolvendo análises de confiabilidade em sistemas sujeitos a falhas interativas ainda estão na “infância”.

A literatura apresenta vários modelos e métodos para a análise de falhas. Podem-se citar modelos baseados em princípios probabilísticos (NARMADA e JACOB, 1996); modelos baseados na teoria Markoviana (PAPAZOGLU, 2000); modelos condicionais (COX e OAKES, 1984); modelos baseados na teoria Bayesiana (PERCY, 2002); modelos baseados em simulação de Monte Carlo (MARSEGUERRA, ZIO e PODOFILLINI *et al.*, 2002); análise de árvore de falhas (FTA-*Fault Tree Analysis*) (SHALEV e TIRAN, 2007); análise dos efeitos e modos de falhas (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) (GILCHRIST, 1993) e modelos híbridos (ROSQVIST, 2000; LANDERS, JIANG e PECK, 2001). Este trabalho propõe o uso da simulação a eventos discretos, combinado com projeto experimental, para a análise de falhas,

levando-se em consideração o efeito da interação destas falhas sobre uma variável de resposta.

Sun *et al.* (2006) afirmam que, na maioria dos casos, as falhas são tratadas de forma independente. Neste trabalho de Sun *et al.* (2006), os autores abordam a taxa de falha interativa, e não seus efeitos. Os autores modelam analiticamente a taxa de falhas em casos de interação e aplicam o modelo em falhas associadas a um componente mecânico (eixo com rolamentos).

### 1.2.2 Objetivos Específicos e Justificativas

Para se obter um modelo computacional que permita a realização dos experimentos, torna-se necessário construir um modelo conceitual do processo. Este modelo conceitual deverá contemplar a lógica do processo e descrever as falhas a serem consideradas. A própria revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 3 deste trabalho demonstra que a maioria das técnicas de modelagem conceitual não foi desenvolvida visando à simulação. Desta forma, para facilitar a representação do sistema a ser simulado, bem como a programação dos efeitos das falhas, apresenta-se como objetivo específico deste trabalho:

1. Desenvolver uma técnica de modelagem conceitual, que permita a representação do sistema a ser simulado, através de uma lógica próxima a utilizada em simulação. Esta técnica deverá ser utilizada na modelagem conceitual dos objetos de estudo deste trabalho, incluindo a representação das falhas.

Segundo Law e Kelton (2000), a etapa de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação. Uma das importantes técnicas de modelagem de processos é a família IDEF. Dentro desta família, as mais difundidas são a IDEF0 e IDEF3. A escolha da técnica IDEF0 se deve ao fato de que ela propicia, para cada função mapeada, o reconhecimento de suas entradas, saídas, mecanismos e

controles. Estas são informações importantes a serem inseridas posteriormente no modelo computacional.

A modelagem em IDEF3, no seu modo de descrição das transições, permite ao modelador reconhecer cada transformação de estado da entidade em processo. O Capítulo 3 deste trabalho irá detalhar estas duas técnicas, além de outras disponíveis na literatura. Também serão citadas pesquisas a respeito do uso destas técnicas de modelagem. Desta forma, a nova técnica de modelagem conceitual a ser apresentada nesta tese deverá conter elementos lógicos da família de técnicas IDEF.

O segundo objetivo específico deste trabalho é:

2. Construir um fluxograma que represente uma seqüência de etapas para a validação estatística de modelos de simulação.

Este fluxograma deverá ser construído a partir da revisão da literatura. Uma vez construído, este fluxograma deverá ser utilizado na fase de validação dos modelos deste trabalho, e poderá ser utilizado para orientar trabalhos de simulação, no que concerne à validação estatística de modelos.

### 1.3 ESQUEMATIZAÇÃO DA PROPOSTA

A proposta desta tese foi esquematizada utilizando-se a técnica IDEF0, como mostra a Figura 1.4. Sua representação está inserida na Figura 1.5. Posteriormente, no Capítulo 3 deste trabalho, esta técnica será detalhada.

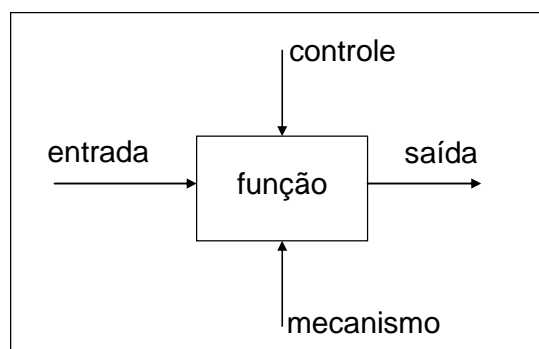


Figura 1.4 – Estrutura básica da técnica de modelagem IDEF0

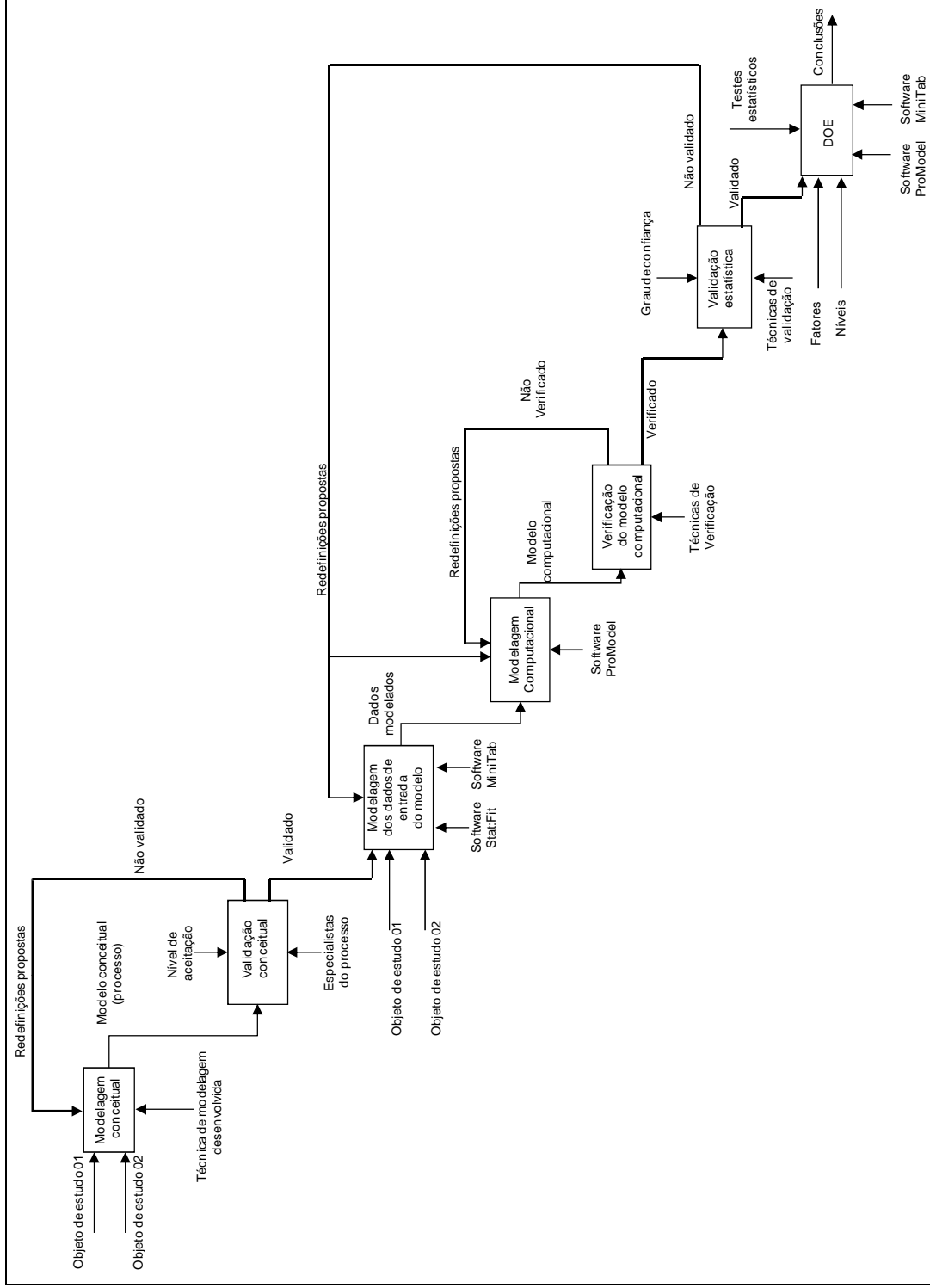


Figura 1.5 – Etapas a serem cumpridas no trabalho, representadas através da técnica IDEF0

## 1.4 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E CONTRIBUIÇÕES

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a relevância científica da pesquisa é principalmente determinada pelo o quê o pesquisador considera de contribuição para a literatura existente. Podem-se distinguir dois tipos de contribuição:

- a) O primeiro tipo de contribuição é o estudo de uma nova variante do processo ou problema, utilizando técnicas de solução já bem conhecidas.
- b) O segundo tipo de contribuição é o estudo de um processo ou problema que já tenha sido estudado antes, mas gerando uma nova, ou em alguns aspectos, melhor solução para o problema, ou pela aplicação de novos tipos de técnicas de solução, ou alcançando melhores resultados com as técnicas já aceitas de solução.

Uma questão que pode ser levantada diz respeito à relevância científica de um trabalho baseado em resultados obtidos com simulação. Para Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa baseada em modelos de simulação geralmente conduz a resultados de qualidade científica baixa, comparado a pesquisas utilizando análise matemática. Porém, a relevância científica dos processos ou problemas estudados através de simulação é muito alta. Isto ocorre porque a simulação computacional pode admitir uma variedade muito grande de modelos científicos, comparado à análise matemática.

Desta forma, consideram-se como contribuições deste trabalho:

- a consideração da interação de falhas na análise de processos de manufatura;
- o uso das técnicas de simulação a eventos discretos e planejamento de experimentos na análise quantitativa do efeito de falhas em processos;
- a elaboração de uma técnica de modelagem conceitual mais focada na lógica de simulação;
- a proposta de um fluxograma contemplando o processo de validação de modelos de simulação.

## 1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este item tem como objetivo classificar este trabalho de acordo com os preceitos metodológicos apresentados em outros trabalhos com este enfoque. A classificação de um trabalho de acordo com a metodologia tem como vantagens a orientação ao próprio autor, da forma como conduzir as etapas de sua pesquisa. Além disto, a classificação metodológica também orienta ao leitor e crítico do trabalho, de forma a explicitar as limitações do método, a abrangência das conclusões e as etapas esperadas.

A pesquisa apresentada nesta tese é classificada como pesquisa aplicada. O desenvolvimento da tese envolve aplicações práticas em processos de manufatura. Além disto, o foco principal da tese é quantitativo. Os efeitos das falhas deverão ser expressos em valores numéricos, devidamente analisados estatisticamente. Os processos analisados serão representados em modelos, cujas variáveis estocásticas assumirão a forma de distribuições.

Pode-se ainda classificar este trabalho como pesquisa experimental, devido à elaboração de um modelo, onde se pretende verificar o efeito de alguns fatores em variáveis de resposta, mediante alterações em variáveis de entrada. Vale destacar que a pesquisa bibliográfica também é contemplada, uma vez que ela permite alinhar os procedimentos adotados com o estado da arte. A Figura 1.6 esquematiza as classificações desta tese.

Já foi realçado anteriormente que esta pesquisa contempla uma modelagem. Analisando a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), pode-se ainda classificar esta tese como uma pesquisa baseada em modelagem quantitativa (*quantitative model-based research*). Esta classificação é atribuída a pesquisas onde modelos de relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho são desenvolvidas, analisadas ou testadas.

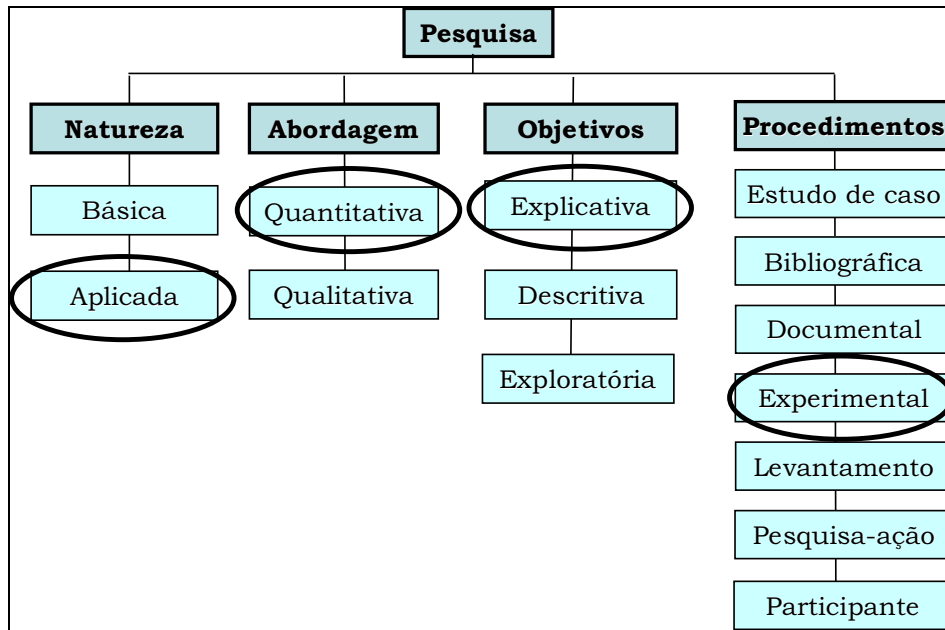


Figura 1.6 – Classificações da pesquisa

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), modelos quantitativos são baseados em um conjunto de variáveis cujos valores variam dentro de um domínio específico, enquanto relações causais e quantitativas são definidas entre estas variáveis.

Modelos são utilizados para explicar ou prever o comportamento ou desempenho de um processo operacional da vida real. Porém, os modelos representam de forma parcial a vida real, isto porque nem todos os aspectos de um problema real são relatados no método ou técnica utilizada. Isto implica na suposição de que estes aspectos faltantes não afetam a efetividade das soluções destes problemas representados pelos modelos.

Esta tese também pode ser classificada como uma pesquisa axiomática. Neste tipo de pesquisa, a preocupação principal do pesquisador é obter soluções com o modelo definido e ter a certeza de que estas soluções provêm reflexões sobre a estrutura do problema definido pelo modelo. A pesquisa axiomática produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis do modelo, baseado nas suposições sobre o comportamento de outras variáveis deste mesmo modelo.

Nesta área têm-se pesquisadores em teorias de decisão, programação dinâmica, otimização matemática, teorias das filas, entre outros.

Ainda segundo Bertrand e Fransoo (2002), outra modalidade de pesquisa, a empírica, pode ser utilizada para testar a validade de modelos e soluções. Esta afirmação permite considerar a pesquisa empírica presente neste trabalho, sobretudo no que tange a validação dos modelos elaborados.

Uma pesquisa quantitativa axiomática na área de Gestão de Operações começa com uma descrição condensada das características do processo operacional ou do problema de decisão que está sendo estudado. Nesta fase relatam-se os artigos “âncora”, os quais contêm descrições das características gerais do processo ou problema estudado, além do relato de artigos recentes que estudam processos ou problemas similares ao processo ou problema em estudo. Desta forma, o processo ou problema em estudo é corretamente posicionado na literatura da área.

Esta tese apresentará uma revisão bibliográfica sobre os quatro temas principais abordados na pesquisa, divididos em capítulos: simulação a eventos discretos, modelagem de processos através de mapeamento, projeto de experimentos e análise de falhas. Além da apresentação dos principais conceitos, cada capítulo apresentará uma revisão sobre pesquisas publicadas sobre cada um dos quatro temas.

Outra etapa é a especificação de um modelo científico para o processo ou problema. O modelo científico deve ser apresentado de maneira formal, com termos matemáticos ou através de simulação computacional.

Neste contexto, Bertrand e Fransoo (2002) assumem que, gradualmente, a complexidade na formulação dos problemas estudados foi crescendo, fazendo uso dos progressos alcançados na matemática, estatística e ciências da computação. Ligado ao avanço das ciências da computação, os autores definem que um caso especial de pesquisa axiomática é a que utiliza simulação computacional.

Esta abordagem é caracterizada quando o resultado não é obtido com análises matemáticas, mas com simulação computacional. Esta técnica é utilizada nos casos onde o modelo ou problema é muito complexo para uma análise matemática formal.

Ainda se apresentam como etapas a preparação do projeto experimental, análise estatística dos resultados e interpretação dos resultados. Estas etapas serão discutidas ao longo deste trabalho.

## 1.6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Por se tratar de um modelo simulado do sistema real, os resultados são aceitos dentro de uma faixa de erro. Esta limitação é inerente à técnica utilizada.

Além disto, os dados referentes às falhas serão obtidos dentro de um período pré-determinado. Desta forma, os resultados encontrados são válidos para o período considerado. Porém, ressalta-se que o ponto mais importante do trabalho está no procedimento adotado, e não no resultado específico.

No capítulo destinado à conclusão deste trabalho, novas limitações serão apontadas, após a descrição completa do procedimento adotado e dos resultados encontrados.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho contém seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho e o Capítulo 2 apresenta uma revisão sobre simulação a eventos discretos. Já no Capítulo 3 apresenta-se a revisão sobre técnicas de modelagem de processos através do mapeamento. O Capítulo 4 e o Capítulo 5 apresentam as revisões sobre o projeto de experimentos simulados e sobre a análise de falhas, respectivamente. Finalizando desta forma a revisão bibliográfica da tese, segue-se para o Capítulo 6, que apresenta a aplicação prática, resultados encontrados e análises realizadas. Por fim, o Capítulo 7 destaca as conclusões, recomendações e trabalhos futuros propostos.

## CAPÍTULO 2 – SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

Este capítulo irá apresentar uma introdução sobre o tema, destacando os termos mais comuns utilizados em simulação, a aplicabilidade, além da opinião de diversos autores sobre as vantagens e desvantagens do uso da simulação. O capítulo ainda apresenta as etapas a serem executadas em simulação. Nestas etapas, o capítulo destaca o uso do modelamento conceitual, da modelagem dos dados de entrada e da implementação do modelo computacional.

O capítulo ainda dará um destaque especial à etapa de verificação e validação dos modelos. Um item que receberá uma especial atenção é a validação através de técnicas estatísticas. A seguir, serão apresentadas considerações sobre a execução do modelo operacional, além de algumas pesquisas sobre o tema.

O capítulo encerra com as considerações finais, apresentando alguns destaques.

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com Chwif e Medina (2006), os sistemas reais geralmente apresentam uma maior complexidade devido, principalmente, a sua natureza dinâmica (que muda seu estado ao longo do tempo) e a sua natureza aleatória (que é regida por variáveis aleatórias). O modelo de simulação consegue capturar com mais fidelidade essas características, procurando repetir em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno. O modelo de simulação é utilizado, particularmente, como uma ferramenta para se obter respostas a sentenças do tipo: “o que ocorreria se...”.

Para Kleijnen (1995), a visão completa do processo de modelagem e simulação envolve arte e ciência.

Apesar da não obrigatoriedade da associação do termo “simulação” ao termo “computacional”, usualmente o termo "simulação" é sinônimo de "simulação computacional". Embora esta possa ser efetuada manualmente, diante do número maciço de cálculos, o tempo gasto para tal seria inviável, em termos práticos (CHWIF,

1999). Neste trabalho, o termo “simulação computacional” será apresentado na forma de “simulação”.

Kelton (1999) salienta que o modelo de simulação faz o papel das funções utilizadas em modelos analíticos, como mostra a Figura 2.1.

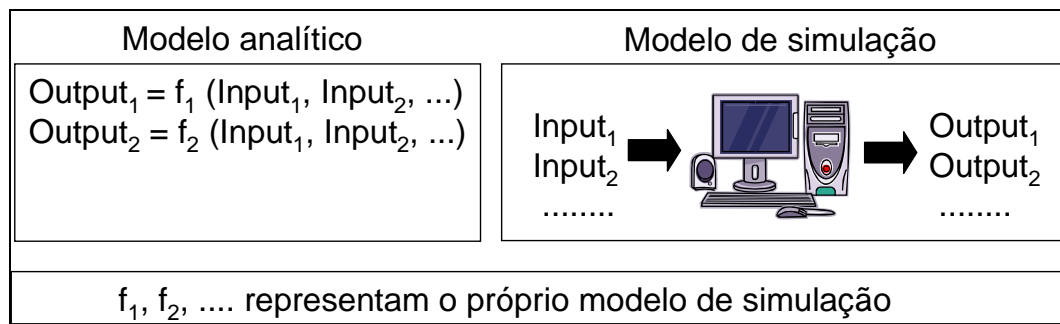


Figura 2.1 – Modelo de simulação transformando *inputs* em *outputs*  
 Fonte: Adaptado de Kelton (1999)

Destacando o papel do modelo, Harrel e Tumay (1997) afirmam que o modelo deve ser válido no sentido de representar satisfatoriamente a realidade, e ser mínimo, no sentido de incluir somente elementos que influenciam no problema a ser solucionado.

Sobre a questão de experimentos em simulação, Law (2006) afirma que o uso de modelos de simulação vem a substituir experimentações diretamente em sistemas reais (existentes ou não), nos quais os experimentos se tornam inviáveis economicamente, ou mesmo impossíveis de se realizar.

Chwif (1999) aponta um importante problema na simulação, que é o tempo despendido. Este tempo é usualmente longo, quando comparado com outras técnicas (analíticas), ou mesmo quando a solução parte da experiência e bom senso do analista. Por este motivo, acredita-se que o estudo de técnicas de redução/simplificação de modelos de simulação seja de grande importância para contribuir com a diminuição deste tempo.

Uma das caracterizações presentes no estudo da simulação é quanto à forma de alteração das variáveis no decorrer do tempo. Segundo Banks (1998), um modelo de simulação a eventos discretos é caracterizado pela mudança no estado das variáveis, ocorrendo somente em pontos discretos do tempo aos quais os eventos ocorrem.

A Figura 2.2 representa uma idéia de Kelton (1995). O autor apresenta a expressão DIDO (*Determinist in, Determinist out*), onde a entrada de valores determinísticos na simulação permite a saída de valores determinísticos. Neste caso, torna-se desnecessária a execução de replicações. Já a Figura 2.3 representa a idéia da expressão RIRO (*Random in, Random out*), onde a entrada de valores aleatórios na simulação permite a saída de valores aleatórios.

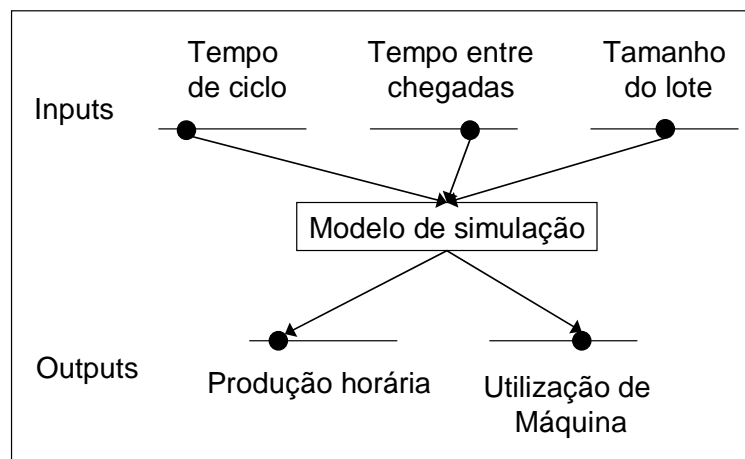


Figura 2.2 – Entrada de valores determinísticos, gerando resultados determinísticos (DIDO)  
 Fonte: Kelton (1995)

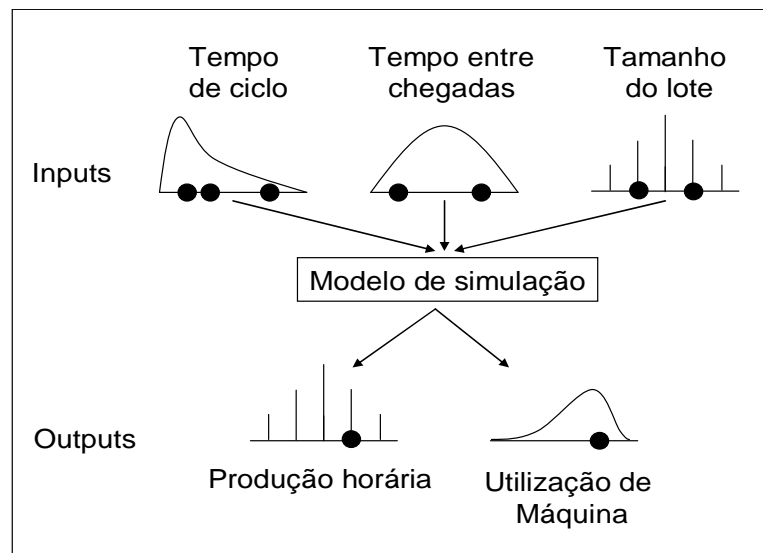


Figura 2.3 – Entrada de valores aleatórios, gerando resultados aleatórios (RIRO)  
 Fonte: Kelton (1995)

## 2.2 ETAPAS SUGERIDAS PARA A SIMULAÇÃO

Alguns autores apresentam uma seqüência de passos, contrariando uma falsa idéia de que a simulação consiste na programação computacional de um modelo. A Figura 2.4 apresenta uma proposta de Chwif (1999), enquanto a Figura 2.5 apresenta um modelo proposto por Montevechi *et al.* (2007).

De acordo com Nance (1983), ocorreu uma mudança de paradigma na comunidade de simulação a eventos discretos, a partir da década de 70 onde, até este período, a simulação era vista somente como a construção de um programa. Sabe-se que a simulação envolve muito mais que a simples construção de um programa, sendo esta atividade apenas uma, dentre as inúmeras atividades de um estudo de simulação.

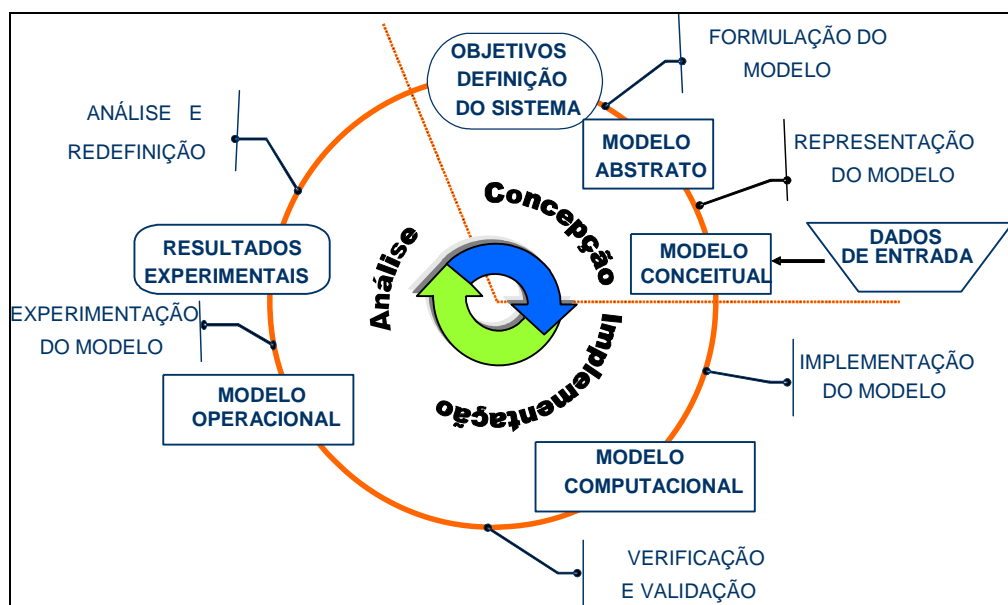


Figura 2.4 – Seqüência de passos para a simulação, segundo Chwif  
Fonte: Chwif (1999).

Na etapa de concepção, o analista de simulação deve entender claramente o sistema a ser simulado e os seus objetivos, através da discussão do problema com especialistas. Questões como o nível de detalhe pretendido no modelo são discutidas.

Kleijnen (1995) afirma que escolha do sistema a ser simulado exige que o analista do problema decida subjetivamente os limites do sistema e os atributos a serem quantificados no modelo.

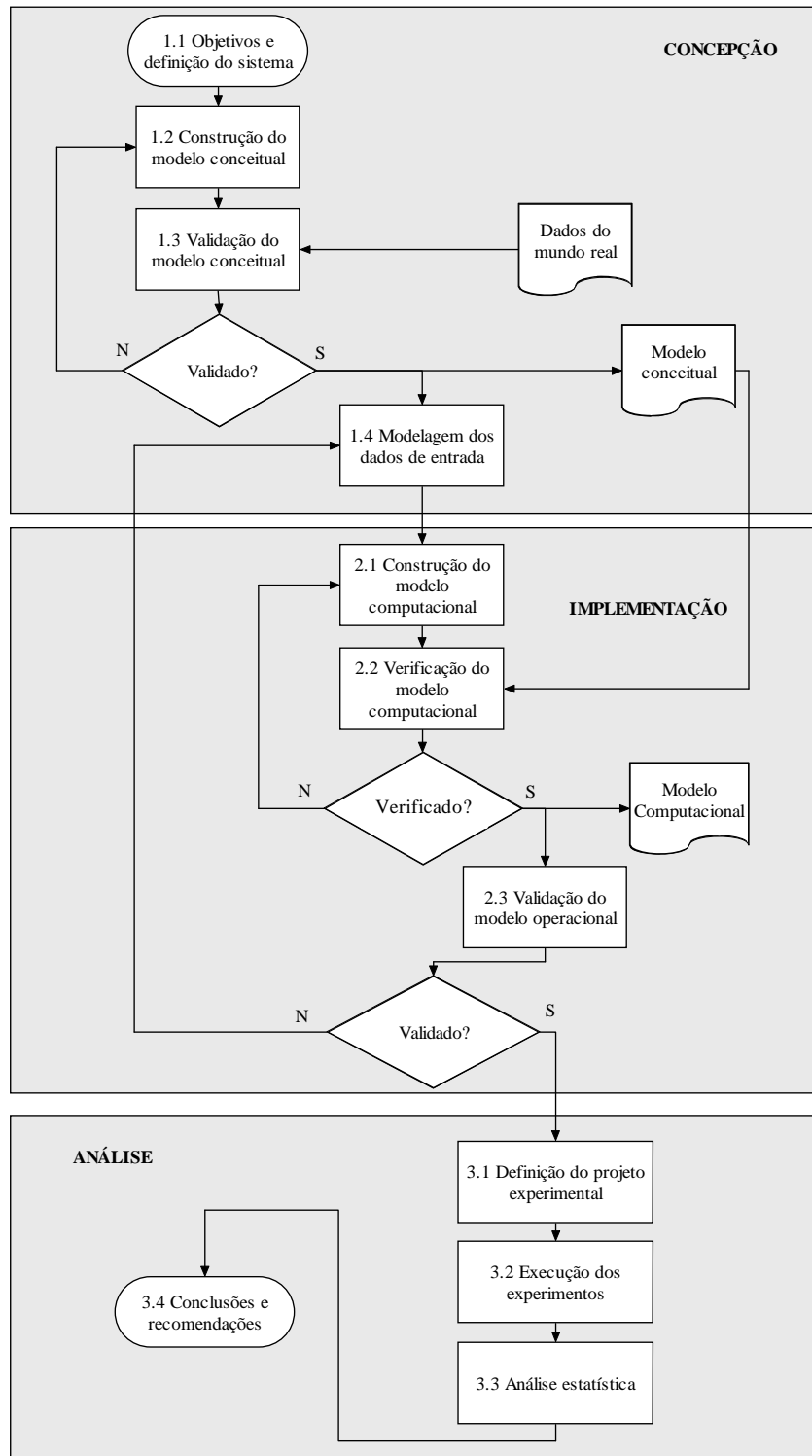


Figura 2.5 – Sequência de passos para a simulação, segundo Montevechi  
 Fonte: Montevechi *et al.* (2007)

Na etapa de concepção, o modelo que está na mente do analista (modelo abstrato) deve ser representado de acordo com alguma técnica de representação de modelo de

simulação, a fim de torná-lo um modelo conceitual, de modo que outras pessoas possam entendê-lo. Os dados de entrada também devem ser coletados nesta fase.

Shannon (1975) já afirmava que havia uma constante interação entre a construção do modelo conceitual e a coleta dos dados. A preocupação em se dispor de dados adequados para alimentar o modelo é exposta na expressão GIGO (*Garbage in - Garbage out*), alertando ao fato de que dados de entrada equivocados ou pouco trabalhados geram resultados igualmente equivocados. No entanto, é importante ressaltar que o modelo é que deve dirigir a coleta de dados e não vice-versa (PIDD, 1996).

Na segunda etapa o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional através da implementação no computador, com a utilização de uma linguagem de simulação ou de um simulador comercial.

O modelo computacional deve, ainda, ser verificado contra o modelo conceitual, a fim de avaliar se está operando de acordo com o pretendido. Alguns resultados devem ser gerados para validar o modelo computacional, observando se o modelo é uma representação adequada da realidade (dentro dos objetivos da simulação).

Na terceira etapa, após a verificação e validação do modelo computacional, este está pronto para a realização dos experimentos, dando origem ao modelo experimental, ou como também é chamado, modelo operacional.

### 2.2.1 Modelo Conceitual

A modelagem conceitual corresponde a uma fase da simulação a eventos discretos, como mostram autores como Chwif e Medina (2006); Law e Kelton (2000). Porém, os próprios autores Chwif e Medina (2006, p.55, grifo do autor) afirmam em seu trabalho que “(...) a etapa de criação do modelo conceitual é **o aspecto mais importante** de um estudo de simulação (...) embora **muitos livros e muitos analistas pulem esta etapa.**”

Em seu trabalho, Sargent (2004) procura explicar a diferença entre o modelo conceitual e o modelo computacional. Segundo este autor, o modelo conceitual é a

representação matemática, lógica ou verbal do problema, e o modelo computadorizado é o modelo conceitual implementado em um computador.

Nethe e Stablmann (1999) sugerem que o desenvolvimento de modelos de processos deve ocorrer antes do desenvolvimento de modelos de simulação, ocasionando desta forma um grande auxílio na coleta de informações relevantes, reduzindo assim os esforços e tempo consumido no desenvolvimento de um modelo de simulação.

Para Balci (2003), o modelo conceitual pode ser utilizado como uma ferramenta de controle aos requerimentos do processo de modelagem e simulação, para avaliar conceitos de simulação, eficácia e erros, como base para o projeto de modelagem e simulação, além de auxiliar no processo de verificação e validação do modelo computacional.

Para Hernandez-Matias *et al.* (2008), não há um único método de modelagem conceitual que pode modelar completamente um sistema complexo de manufatura. Como resultado das limitações destas técnicas, diferentes métodos integrados de modelagem têm sido desenvolvidos.

Chwif, Paul e Barreto (2006) propõem uma técnica para redução da complexidade de um modelo de simulação a eventos discretos já na fase de modelagem conceitual. A importância do modelo conceitual também é destacada no trabalho de Zhou, Zhang e Chen (2006). Neste trabalho, os autores propõem que a automação pode auxiliar na melhoria dos resultados da utilização de modelos conceituais em simulação.

Devido à importância atribuída a este item, o Capítulo 3 deste trabalho apresenta técnicas de modelagem a serem aplicadas na etapa de modelamento conceitual.

### **2.2.2 Modelagem dos dados de entrada**

A idéia nesta etapa é modelar os dados de entrada para se obter modelos probabilísticos que permitam inferir as propriedades de um dado fenômeno aleatório.

De acordo com Nelson e Yamnitsky (1998), a modelagem de dados é um processo facilitado quando as seguintes condições são válidas:

- o processo de entrada de dados pode ser representado por uma seqüência de variáveis aleatórias independente e identicamente distribuída;
- a distribuição das variáveis aleatórias pode ser aproximada por um modelo probabilístico conhecido e encontrado em pacotes comerciais;
- os dados estão disponíveis de modo que seus parâmetros possam ser estimados.

Para Vicent (1998), o aspecto mais difícil da modelagem dos dados de entrada de uma simulação é a união de dados com qualidade suficiente, quantidade e variedade para obter uma análise razoável.

Após coletados os dados, estes devem ser tratados. O tratamento consiste em se utilizar técnicas para descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento a cerca do fenômeno. Nesta fase torna-se comum o uso de pacotes comerciais (*best fitting*).

Nelson e Yamnitsky (1998) já apontavam um grande número de pacotes de *software* para dar suporte na modelagem de dados de entrada, como o *ExpertFit*, o *Arena Input Processor*, *Stat::Fit* e *BestFit*.

Após a coleta dos dados e análise, inferi-se qual o comportamento da população a partir de uma amostra. Como resultado, tem-se um modelo probabilístico que representará o fenômeno aleatório em estudo e este será incorporado ao modelo de simulação.

### 2.2.3 Implementação computacional

Com o passar dos anos, houve uma grande evolução das interfaces gráficas dos sistemas operacionais dos PCs, favorecendo os *softwares* de simulação a ficar bem mais fáceis de operar, devido à construção dos modelos ter se tornado mais gráfica e menos textual.

Um ponto importante em um estudo de simulação (porém não fundamental) é a escolha correta do *software* de simulação. Para Chwif e Medina (2006), não é fundamental pois o ponto mais importante é o *humanware*, ou o analista que está

realizando o estudo. Porém, não se pode negar que a seleção do *software* e do *hardware* influencia sobretudo o tempo total de um estudo de simulação. Uma possível fonte de informações sobre os *softwares* de simulação é a revista eletrônica *OR/MS Today* (2005), mantida pelo *Institute for Operations Research and the Management Sciences – Informis*. Esta revista apresenta uma *survey* com os principais *softwares* de simulação, relacionando vendedores, principais usos, custos, principais clientes, sistema operacional utilizado, etc.

Não é objetivo deste trabalho comparar as várias opções de *softwares*. A preocupação central é demonstrar que existem opções de escolha.

## 2.2.4 Verificação e validação de modelos

Chwif e Medina (2006) destacam em seu trabalho a preocupação com a confusão gerada entre os termos validação e verificação, como mostra a Figura 2.6. O termo validação está relacionado ao modelo conceitual (existe outro tipo de validação denominada validação operacional, mas quando se retrata somente à validação, está se referindo à validação conceitual). Neste caso, o objetivo de validar o modelo é o mesmo de responder à seguinte pergunta: “será que está se desenvolvendo o modelo correto?”, ou mesmo “será que as considerações feitas, o nível de detalhe, o escopo do modelo, representarão de forma adequada o sistema a ser simulado”?

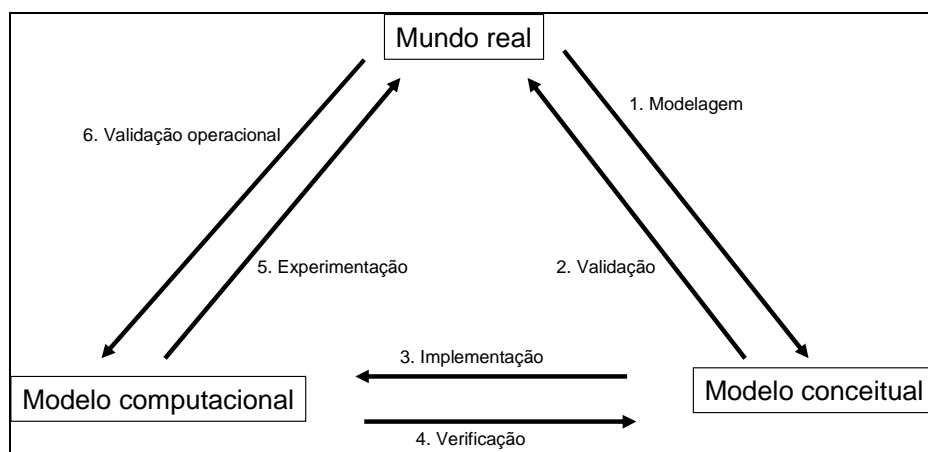


Figura 2.6 – A verificação e validação em um projeto de simulação.  
Fonte: Chwif e Medina (2006)

Pode-se perceber, segundo a visão de Chwif e Medina (2006), a distinção do termo “validação” associado ao modelo conceitual. Law e Kelton (2000) já haviam defendido esta idéia. Segundo eles, a validação está focada na determinação se o modelo conceitual de simulação (ao invés do programa computacional) é uma representação correta e verdadeira do sistema sob estudo.

Já o termo “verificação”, de acordo com Balci (1997), sempre está relacionado com o modelo computacional (ou modelo implementado em algum *software* de simulação). Neste caso, a pergunta a ser feita é: “será que está se desenvolvendo o modelo corretamente?”. Para os autores como Chwif e Medina (2006), verificar, num sentido mais simplista, significa retirar os *bugs* do modelo. A validação está relacionada com o que será modelado e a verificação está relacionada com o modo como o modelo está sendo implementado.

Para Balci (1997), os processos de validação e verificação devem ser quase que contínuos durante a modelagem e simulação. Verificar e validar somente no final do projeto seria análogo, segundo o autor, a um professor avaliar um aluno somente em um exame final, sem monitorar seu rendimento e apontar suas deficiências, durante o ano letivo.

Surge então a proposta de uma verificação completa e uma validação completa. Porém, na visão de Kleijnen (1995), a verificação objetiva um programa computacional perfeito, de tal forma que o código de programação utilizado não contenha erros. A validação, entretanto, não pode ser utilizada para resultar modelos perfeitos, pois pela definição modelos perfeitos seriam os próprios sistemas reais. Um modelo deve ser bom o suficiente, o qual depende dos objetivos do modelo.

De acordo com Chwif e Medina (2006), duas importantes regras da verificação e validação devem sempre ser levadas em consideração:

- a) não há como validar um modelo 100% ou garantir que ele seja 100% válido. O que se consegue é aumentar a confiança no modelo ou mesmo acreditar que ele representa satisfatoriamente o sistema;
- b) não há como garantir que um modelo seja totalmente livre de *bugs*. Ou seja, embora o modelo possa ser verificado para determinada circunstância, não há

como garantir que, para quaisquer circunstâncias, funcione conforme o pretendido.

Balci (1997) também faz algumas considerações sobre o processo de verificação e validação de modelos (V&V):

- a) a V&V deve ser conduzida ao longo de todo o ciclo da modelagem e simulação;
- b) os resultados da V&V não devem ser considerados como uma variável binária, onde o modelo é absolutamente correto ou absolutamente incorreto;
- c) um modelo de simulação é construído respeitando aos objetivos do projeto de modelagem e simulação, e sua credibilidade é julgada de acordo com estes objetivos;
- d) a V&V requer independência para prevenir algum tipo de favorecimento do desenvolvedor do modelo;
- e) a V&V é um processo difícil que exige criatividade e perspicácia;
- f) o teste completo de um modelo de simulação é impossível;
- g) a V&V deve ser planejada e documentada;
- h) erros devem ser detectados o quanto mais cedo possível no ciclo da modelagem e simulação;
- i) um problema bem formulado é essencial para a aceitabilidade dos resultados do ciclo de modelagem e simulação.

#### 2.2.4.1 Técnicas para verificação de modelos

A literatura apresenta algumas técnicas de verificação de modelos, como:

- a) implementação modular/verificação modular (CHWIF e MEDINA, 2006; BANKS, 1998): a confecção do modelo em partes permite uma verificação focada em cada parte do modelo construída, o que facilita a identificação de erros no modelo e uma ação corretiva mais clara ao modelador. Esta técnica

- de verificação complementa a idéia de que o modelo não deve ser construído na sua forma final logo na primeira vez. Este deve ser incrementado na medida em que o modelador realiza a verificação da versão anterior;
- b) uso de valores constantes ou simplificados *versus* cálculos nominais (CHWIF e MEDINA, 2006; KLEIJNEN, 1995): tomar os valores médios de cada distribuição e considerar estes valores como constantes e determinísticos. É claro que os resultados estarão incorretos, mas torna-se possível comparar os resultados do modelo com resultados de uma planilha de cálculo;
  - c) utilização do *debugger* ou depurador (CHWIF e MEDINA, 2006; BANKS, 1998): a presença de um depurador em *softwares* de simulação favorece o uso desta técnica;
  - d) uso da animação gráfica (CHWIF e MEDINA, 2006; KLEIJNEN, 1995; BANKS, 1998): considerada uma poderosa ferramenta de verificação, a animação permite ao modelador acompanhar o processo na tela do computador. Eventos como o abastecimento de postos de trabalho, formação de filas, trajeto de itens, movimentação de funcionários, paradas para manutenção, podem ser visualizados através da animação gráfica, permitindo ao modelador verificar a presença de possíveis falhas na programação. A animação permite não apenas a visualização de erros de programação, mas erros conceituais, o que também implica no processo de validação.

Segundo Kleijnen (1995), o analista pode avaliar alguns resultados intermediários da simulação manualmente e comparar estes resultados com os dados de saída da simulação. O processo de captura de todos os resultados intermediários do modelo computacional, de forma automática, é chamada de *tracing*. O autor também aponta como técnica de verificação a comparação dos dados de saída da simulação com resultados analíticos (quando possível). Esta ação é facilitada com o uso de valores constantes ou simplificados para as variáveis de entrada, confirmando o item b apresentado logo acima.

Banks (1998) também aponta como técnica de verificação a documentação da construção do modelo, através da presença de comentários nas linhas de programação.

#### 2.2.4.2 Técnicas para validação de modelos

De acordo com Kleijnen (1998), casos onde o modelo é inválido, mas se aceita este modelo como um modelo válido, correspondem aos erros mais comuns em simulação. Este erro é também conhecido como risco do usuário do modelo. Ainda segundo o autor, a escolha do valor de  $\alpha$  no teste de hipóteses é problemático. Os valores mais utilizados são 0,10 e 0,05. A escolha depende da análise das conseqüências financeiras, segundo o autor.

Algumas técnicas de validação podem ser apontadas:

- a) teste de *Turing* ou validação *black-box* (CHWIF e MEDINA, 2006; KLEIJNEN, 1995; SARGENT, 2004): escolhe-se uma pessoa que entenda bem do sistema (especialista) que foi simulado e apresenta-se a ela dois conjuntos de dados de saída, um vindo do sistema real e outro do modelo de simulação. Caso o especialista não consiga distinguir se os resultados são oriundos do sistema real ou do modelo de simulação, então o modelo poderia, em certa extensão, ser considerado “válido”;
- b) duplicação de modelos (CHWIF e MEDINA, 2006): prática eficiente, porém onerosa, pois supõe a existência de duas equipes independentes desenvolvendo modelos do mesmo sistema. Desta forma, se as duas equipes (operando de forma independente), desenvolverem modelos similares, este seria um bom indicador da validade do modelo;
- c) comparação com modelos anteriores (CHWIF e MEDINA, 2006): desenvolvimento de um modelo a partir de outro já validado;
- d) validação face-a-face (CHWIF e MEDINA, 2006; KLEIJNEN, 1995; SARGENT, 2004): discussão com especialistas, objetivando alcançar com estes especialistas o aval para o uso do modelo (aplicado tanto no modelo conceitual como no operacional). Nesta técnica de validação, Kleijnen (1995) defende a utilização da animação, como forma de apresentação do modelo aos especialistas;

- e) comparação dos dados reais e simulados (CHWIF e MEDINA, 2006, KLEIJNEN, 1995; SARGENT, 2004): pode-se plotar os dados de saída do sistema real e do modelo simulado, em um eixo horizontal, representando o tempo, e um eixo vertical, representando o sistema real e o simulado. Através da observação, o analista pode perceber se os dados da simulação refletem o comportamento dos dados reais. O teste  $t$  é indicado pelos autores nesta técnica;
- f) teste de condição extrema (SARGENT, 2004): analisar o comportamento do modelo quando os dados de entrada são colocados em condições extremas. Esta forma de validar é criticada por Kleijnen (1995), ao argumentar a dificuldade de se definir o que seria uma condição extrema;
- g) uso de dados históricos (CHWIF e MEDINA, 2006; KLEIJNEN, 1995; SARGENT, 2004): pode-se utilizar dados históricos para calibrar o modelo. Desta forma, não se utilizaria um modelo probabilístico, mas sim dados históricos que representam o ocorrido durante o ano, por exemplo. Conseqüentemente, as saídas do modelo devem ser compatíveis com o desempenho verificado no sistema. Os autores recomendam o uso do teste  $t$  emparelhado nesta técnica de validação.

Ainda discutindo a questão do uso de dados históricos, Kleijnen (1995) alerta que, em algumas situações, é impossível se obter dados relevantes. O autor cita o caso de estudos de simulação de uma guerra nuclear.

Sargent (2004) destaca a preocupação com a validação desde a fase do modelamento conceitual. Segundo o autor, há dois tipos de suposições do modelo conceitual. São as suposições estruturais (a respeito das operações do sistema do mundo real) e as suposições de dados. As suposições estruturais podem ser validadas através de observações do sistema do mundo real e através de discussões com o pessoal especializado no sistema. O autor destaca que nenhuma pessoa conhece tudo sobre o sistema. Desta forma, várias pessoas precisam ser consultadas para a validação das suposições do modelo conceitual.

A validação através da comparação dos resultados fornecidos pelo modelo e dos resultados obtidos no sistema real deve ocorrer através de testes estatísticos. Uma das formas a serem citadas foi apresentada no trabalho de Kleijnen (1995). A idéia consiste em tomar o intervalo de confiança para a diferença entre os dois conjuntos (dados do modelo e dados do sistema). Se o intervalo contiver o zero pode-se afirmar que com um nível de confiança  $[(1-\alpha) \times 100\%]$  que as respostas são equivalentes (do sistema real e do modelo de simulação). Neste caso, o intervalo de confiança pode ser construído como mostra a equação (2.1).

$$\overline{Xs} - \overline{Xr} \pm t_{2n-2, \alpha/2} \sqrt{\frac{Ss^2 + Sr^2}{n}} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1) tem-se que:

- $\overline{Xs}$  é a média do resultado obtido a partir da simulação do sistema;
- $\overline{Xr}$  é a média do resultado obtido a partir do sistema real;
- $Ss$  é o desvio padrão do resultado obtido a partir da simulação do sistema;
- $Sr$  é o desvio padrão do resultado obtido a partir do sistema real;
- $n$  é o número de observações obtidas (deve ser igual tanto na simulação quanto nos resultados reais);
- $t_{2n-2, \alpha/2}$  é a distribuição *t* de Student para  $2n-2$  graus de liberdade e um nível de significância de  $\alpha/2$ .

Chung (2004) apresenta em seu trabalho algumas técnicas para validação de modelos de simulação, através também da comparação com os resultados do sistema. Para o autor, o uso do teste *F* compara a variância dos dados do sistema e dos dados do modelo. Há uma certa quantidade de implementações do teste *F*, porém, na visão do autor, somente uma versão é necessária para praticantes de simulação. Este teste é apresentado na equação (2.2).

$$F = \frac{S_M^2}{S_m^2} \quad (2.2)$$

Na equação (2.2) tem-se que:

- $S_M^2$  é a variância do conjunto de dados com a maior variância;
- $S_m^2$  é a variância do conjunto de dados com a menor variância.

Neste caso, segundo o autor, tem-se a seguinte hipótese nula: a variância de ambos os conjuntos de dados (sistema real e modelo) é similar. A hipótese alternativa aponta para a não similaridade de variância entre os conjuntos. Deve-se selecionar o nível de significância e determinar o valor crítico para  $F$  (através do uso de tabelas). Calculando o valor de  $F$  na equação (2.2), rejeita-se a hipótese nula se o teste estatístico exceder o valor crítico.

Ainda segundo Chung (2004), o teste  $t$  é utilizado quando os dados são normais (podem ser representados por uma distribuição normal) e os conjuntos de dados têm variância similar. Este teste determinará se há uma diferença estatisticamente significativa entre os conjuntos analisados, dado um nível de significância.

Como definido acima, o teste  $t$  parte do pressuposto que os conjuntos analisados são normais. Para averiguar este fato, é necessário um teste de normalidade. Alguns testes podem ser utilizados, como o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, ou *Anderson-Darling*. Alguns pacotes estatísticos, como o Minitab®, oferecem ao usuário estes testes de normalidade.

No teste  $t$ , segundo Chung (2004), tem-se a seguinte hipótese nula: as médias de ambos os conjuntos são iguais. Deve-se selecionar o nível de significância e determinar o valor crítico para  $t$  (através do uso de tabelas). Calculando o valor de  $t$  na equação (2.3), rejeita-se a hipótese nula se o teste estatístico  $t$  for maior que o valor crítico ou menor que o negativo do valor crítico.

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (2.3)$$

Na equação (2.3) tem-se que:

- $t$  é o teste estatístico calculado;
- $\bar{x}_1$  é a média do primeiro conjunto;
- $\bar{x}_2$  é a média do segundo conjunto;
- $s_1^2$  é a variância do primeiro conjunto;
- $s_2^2$  é a variância do segundo conjunto;
- $n_1$  é o número de dados do primeiro conjunto;
- $n_2$  é o número de dados do segundo conjunto.

O método de *Smith-Satterthwaite* é apresentado por Chung (2004) para o caso onde os dados do sistema e do modelo são normais, mas com variância não similar. Este teste considera as diferenças de variâncias ajustando os graus de liberdade para um valor crítico  $t$ .

A aplicação deste método inicia-se com o cálculo do número de graus de liberdade, através da equação (2.4).

$$gl = \frac{\left( \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left( \frac{s_1^2}{n_1} \right)^2}{(n_1 - 1)} + \frac{\left( \frac{s_2^2}{n_2} \right)^2}{(n_2 - 1)}} \quad (2.4)$$

Na equação (2.4) tem-se que:

- $gl$  é o número de graus de liberdade;
- $s_1^2$  é a variância do primeiro conjunto;
- $s_2^2$  é a variância do segundo conjunto;
- $n_1$  é o número de elementos do primeiro conjunto;
- $n_2$  é o número de elementos do segundo conjunto.

Uma vez determinado o número de graus de liberdade, executa-se um teste  $t$ , como mostra a equação (2.5). O valor de  $t$  crítico é obtido em tabelas, a partir do

número de graus de liberdade calculado. As condições para a não rejeição de hipótese nula são as mesmas citadas anteriormente.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.5)$$

Na equação (2.5) tem-se que:

- $t$  é o teste estatístico para o método de *Smith-Satterthwaite*;
- $\bar{x}_1$  é a média do primeiro conjunto;
- $\bar{x}_2$  é a média do segundo conjunto;
- $s_1^2$  é a variância do primeiro conjunto;
- $s_2^2$  é a variância do segundo conjunto;
- $n_1$  é o número de elementos do primeiro conjunto;
- $n_2$  é o número de elementos do segundo conjunto.

Em situações onde qualquer um ou mesmo ambos os conjuntos de dados não forem normais, utiliza-se um teste não paramétrico, como o teste U, ou teste de soma de *ranking*, por exemplo.

Para Montgomery e Runger (2003), tradicionalmente denomina-se métodos paramétricos os procedimentos baseados em uma família paramétrica particular de distribuições, sendo neste caso a normal. Felizmente, a maioria destes procedimentos é relativamente insensível a leves desvios da normalidade. Não se faz suposições acerca da distribuição da população em estudo em métodos não paramétricos, **exceto o fato de ela ser contínua** (este fato será ainda discutido neste item).

Montgomery e Runger (2003) destacam o teste de *Wilcoxon* da soma dos postos, para casos não paramétricos, onde  $H_0: \mu_1 = \mu_2$ . Segundo os autores, esse procedimento é algumas vezes chamado de teste de *Mann-Whitney*, embora a estatística de teste de *Mann-Whitney* seja geralmente expressa em uma forma diferente.

Os autores afirmam que este procedimento sugere que as duas amostras sejam agrupadas, em ordem crescente de magnitude, mantendo-se visível de qual amostra cada dado provém. Considerando  $W_1$  e  $W_2$  a soma dos postos de cada uma das duas amostras, toma-se um certo  $\alpha$  (como 0,05), e analisa-se o valor de  $w_{0,05}$ , na tabela de valores críticos para o teste de Wilcoxon da soma dos postos. Não se rejeita  $H_0$  caso  $W_1$  e  $W_2$  forem maiores que  $w_\alpha$ .

Observando as afirmações de Montgomery e Runger (2003), apresentadas neste tópico, pode-se destacar a passagem onde os autores apontam que não se faz suposições acerca da distribuição da população em estudo em métodos não paramétricos, exceto o fato de ela ser contínua. Porém, algumas variáveis de resposta podem ser caracterizadas por serem discretas, e não contínuas.

Em muitos casos na manufatura, por exemplo, é viável mensurar, como variável de resposta, o número de peças produzidas por dia. Este é um caso típico de distribuição de *Poisson*. A distribuição de Poisson, segundo Triola (2005), é uma distribuição discreta de probabilidade, aplicável a ocorrências de um evento em um intervalo específico.

Os autores Bisgaard e Fuller (1994) afirmam que quando se utiliza uma contagem de defeitos em produtos ou mesmo de produtos defeituosos em um experimento, a suposição de variância constante feita com quase todas as análises padrão é violada. Segundo os autores, um método comum para tratar este problema é transformar os dados antes da análise, de forma que a suposição de variância constante seja mais provável. No trabalho destes autores, eles apresentam várias transformações que podem ser utilizadas para estabilizar de forma aproximada a variância da contagem de defeitos.

Bisgaard e Fuller (1994) ainda afirmam que, em trabalhos com projeto de experimentos, tipicamente a resposta é medida em uma escala contínua. Entretanto, em muitos casos, a única medida econômica de qualidade é a simples contagem de número de defeitos ou de peças defeituosas. Quase todos os métodos estatísticos padrões, em particular os métodos utilizados para a análise de experimentos fatoriais, são baseados na suposição que a resposta é medida em escala contínua e possui variância constante.

Curiosamente, Bisgaard e Fuller (1994) salientam que eles poderiam simplesmente ignorar o problema e utilizar as ferramentas padrão. Porém, é conveniente utilizar um simples “remédio” que proporciona uma análise mais sensível. Este “remédio” é a transformação de estabilização da variância.

Segundo os autores, derivações teóricas mostram que é possível conseguir uma variância aproximadamente constante para contagens de defeitos, através da raiz quadrada dos dados obtidos na contagem, no caso de uma distribuição de *Poisson*. A Tabela 2.1 demonstra estas relações.

Tabela 2.1 – Funções para transformação da distribuição discreta em contínua.  
Adaptado de Bisgaard e Fuller (1994)

<b>Tipo de dado</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Transformação</b>
Proporção p (exemplo: unidades defeituosas em uma amostra de n unidades)	Binomial	$ar \cos \text{seno} \sqrt{p}$
Contagem c (exemplo: quantidade de defeitos por unidade)	<i>Poisson</i>	$\sqrt{c}$

A partir dos testes e procedimentos estatísticos apresentados, pode-se concluir o fluxograma representado na Figura 2.7.

### 2.2.5 Execução do modelo operacional

Ao término da etapa de verificação e validação, o modelo de simulação torna-se operacional, estando pronto a ser utilizado. Pode-se agora realizar diferentes experimentos de simulação com o modelo. Contudo, como as entradas da simulação são processos aleatórios, em cada replicação ou experimento realizado têm-se saídas cujos valores serão aleatórios.

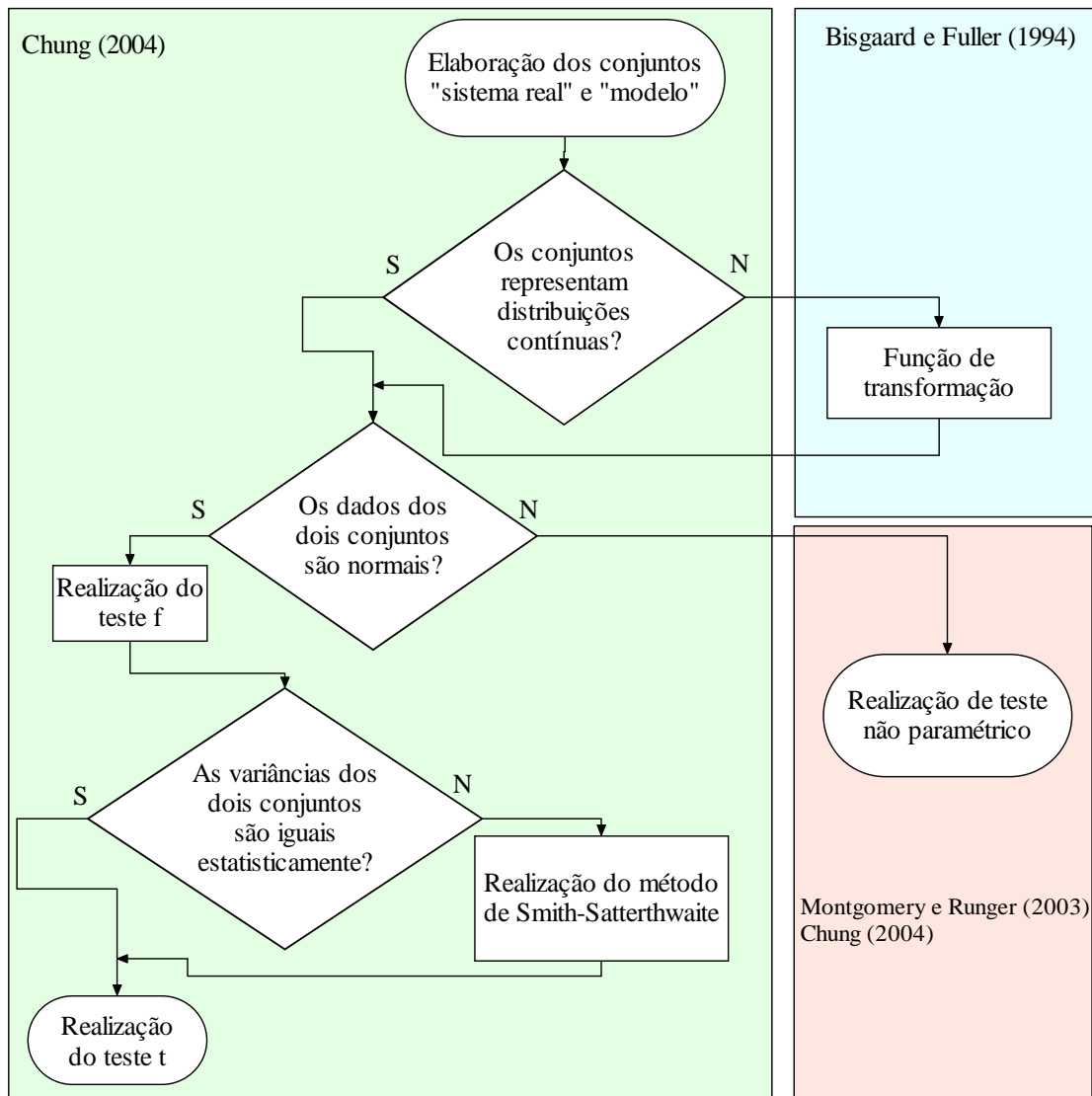


Figura 2.7 – Procedimentos e testes estatísticos para validação de modelos de simulação

Chung (2004) alerta que devido ao fato de que os resultados da simulação apresentarem variações é inapropriado tirar conclusões em cima de uma única execução da simulação. Para reduzir as chances de uma recomendação errada após a experimentação, é necessário executar certo número de replicações e então basear as recomendações em todos os dados disponíveis.

Torna-se importante a partir deste ponto diferenciar os termos “replicação” e “rodada”. Segundo Chwif e Medina (2006), quando se fala em rodada, está se referindo ao que ocorre quando se seleciona ou inicia-se o comando que executa a simulação no computador. Cada rodada do modelo deve ser entendida como um novo experimento, onde cada uma destas rodadas pode ter várias replicações. A replicação é

uma repetição da simulação do modelo, com a mesma configuração, a mesma duração e com os mesmos parâmetros de entrada, mas com uma semente de geração dos números aleatórios diferente.

A apresentação dos resultados da simulação deve levar em consideração a confiança estatística e a precisão. De acordo com Chwif e Medina (2006), a confiança estatística refere-se a um intervalo de valores que contém a média da população, com uma certa probabilidade. Já a precisão refere-se ao tamanho do intervalo.

Conforme Devore (2000) e Chung (2004), um intervalo de confiança  $[100(1-\alpha)\%]$  para a média de uma população é construído através da equação (2.6), ou mesmo a equação (2.7).

$$P(\bar{x} - h \leq \mu \leq \bar{x} + h) = 1 - \alpha \quad (2.6)$$

$$\bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.7)$$

Os termos utilizados nas equações (2.6) e (2.7) são os seguintes:

- $\bar{x}$  é a média da amostra;
- $h = t_{n-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$  é a metade do tamanho do intervalo, denominado de precisão;
- $t_{n-1, \alpha/2}$  é o  $(1-\alpha/2)$  percentil da distribuição  $t$  de *Student* com  $n-1$  graus de liberdade;
- $s$  é o desvio padrão da amostra;
- $n$  é o número de dados da amostra.

O número de dados da amostra pode ser entendido como o número de réplicas utilizado. O aumento da precisão (redução do tamanho do intervalo) pode ser obtido através do aumento do número de replicações. Esta é uma forte vantagem da simulação, pois uma vez obtido o modelo operacional, cabe ao modelador decidir o número de replicações.

O número de replicações a serem realizadas, para se obter a precisão desejada, torna-se então uma decisão a ser tomada pelo modelador. Para Chung (2004), a

seleção do número inicial de replicações é arbitrária. Um número comum é de 10 replicações, segundo o autor.

O procedimento consiste em extrair da população um número  $n$  de amostras e construir o intervalo de confiança do parâmetro desejado. Se a precisão do intervalo obtido ainda não for menor do que a desejada, recomenda-se, segundo Chwif e Medina (2006), o uso da equação (2.8).

$$n = n_{\text{utilizado}} \left( \frac{h_{\text{obtido}}}{h_{\text{desejado}}} \right)^2 \quad (2.8)$$

Segundo Chung (2004), existem duas abordagens para o cálculo do nível de precisão: a comparação absoluta do erro padrão, para um dado nível de tolerância, e a comparação do valor relativo do erro padrão, para uma média amostral. A segunda alternativa, segundo o autor, é preferida, pois não é necessário selecionar um valor arbitrário absoluto de nível de precisão. A abordagem da precisão relativa pressupõe o cálculo de uma taxa, que corresponde à divisão do erro padrão dos dados pelo valor da média dos dados.

Chung (2004) afirma ainda que o valor comumente utilizado para a precisão relativa é 0,10. Isto significa que se deseja que o erro padrão seja somente 10% do valor da média da amostra. A precisão relativa está representada na equação (2.9).

$$h_{\text{relativo}} = \frac{t_{1-\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{x}} \quad (2.9)$$

Caso o sistema modelado seja não-terminal, ou seja, não possua um momento pré-determinado para o término da simulação, a simulação deve ser executada de modo que os dados de saída sejam obrigatoriamente coletados durante o estado de regime permanente.

O período transitório é chamado de *warm-up*. De acordo com Robinson (2007), a seleção do período de *warm-up* para uma simulação a eventos discretos continua a ser problemático. Na visão de Chwif e Medina (2006), o modo mais prático para a determinação do tempo de *warm-up* é através da observação.

Todas as considerações apresentadas neste item do trabalho têm o objetivo de promover uma forma correta de apresentação dos resultados da simulação. Porém, um grande número de artigos vem demonstrando a importância de se projetar os experimentos antes das execuções das rodadas. Apesar da não obrigatoriedade desta fase, torna-se importante destacar, no próximo item deste trabalho, o uso do projeto de experimentos (DOE – *Design of Experiments*) na simulação.

### 2.2.6 Projetos de experimentos

Para Sanchez (2006), o processo de construção, verificação e validação de um modelo de simulação pode ser árduo, mas uma vez que esteja completo, chega o momento de fazer o modelo trabalhar para o modelador. Uma excelente forma de obter este trabalho é utilizar um projeto experimental para explorar o modelo.

Ainda segundo a autora, os benefícios de um projeto de experimentos para a simulação são enormes. Este item será apresentado de forma mais detalhada no Capítulo 4 deste trabalho.

## 2.3 PESQUISAS EM SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS

Inúmeros trabalhos de simulação a eventos discretos podem ser encontrados na literatura.

No setor de manufatura, Abdulmalek e Rajgopal (2007) utilizam a simulação a eventos discretos, através do *software* Arena, em um mapeamento da cadeia de valor de um processo projetado segundo os princípios do *lean manufacturing* (manufatura enxuta). Ainda no ambiente *lean*, Torga (2007) realiza uma simulação e otimização de um sistema puxado de manufatura.

Casos de aplicação podem ser encontrados na área de programação da produção. Trabalhos como de Kumar e Sridharan (2007) utilizaram a modelagem e simulação para verificar a combinação de regras de seqüenciamento. Porém, neste caso, a simulação ocorreu através do uso de programação em C.

Focando a questão da amostragem, Saliby e Paul (1993) discutem a amostragem descritiva em modelos de simulação a eventos discretos. Saliby (1990) ainda discute a questão da variabilidade em resultados de simulação.

Aplicações de simulação a eventos discretos podem ser encontradas em problemas de projeto de *softwares*. Kouskouras e Georgiou (2007) implementaram um modelo de simulação do processo de projeto de *softwares*, trabalhando com tempo de entrega e métricas de qualidade. Nesta simulação, os autores validaram o modelo através do recurso de animação, observando o comportamento do modelo, além de variarem os dados de entrada, observando os resultados obtidos. Os próprios autores afirmam que técnicas mais objetivas de validação devem ser empregadas para aperfeiçoamento do modelo.

Raja e Rao (2007) utilizaram a simulação para avaliar rotas dentro do fluxo produtivo, em uma empresa do setor têxtil. Neste trabalho, os autores utilizaram teste de hipóteses na validação.

O uso combinado de simulação e otimização é discutido em trabalhos como de Van Volsen, Dullaert e Van Landeghem (2007). Neste trabalho, os autores procuram otimizar estratégias de inspeção em sistemas de produção com múltiplos estágios de trabalho.

A dificuldade da validação operacional, por meio de técnicas estatísticas, é destacada por Potter, Yang e Lalwani (2007). Modelando um processo de produção de aço, os autores validam operacionalmente o modelo através da comparação da média e desvio padrão dos tempos simulados e reais, gastos no processo.

A simulação de estratégias de terceirização é abordada por Liston *et al.* (2007). Nesta simulação, os autores inseriram valores de custo no modelo.

Não somente no setor de manufatura podem-se encontrar aplicações de simulação a eventos discretos. Segundo Laughery, Plott e Scott-Nash (1998), se o sistema de serviço é estocástico, complexo, com restrições de recursos e razoavelmente bem definido, este é um candidato para análise com simulação.

Greasley (2003) utilizou uma aplicação da simulação no processo de custódia de prisioneiros pela força policial. Segundo o autor, os problemas verificados foram o grande número de policiais executando tarefas que poderiam ser automatizadas ou

mesmo desempenhadas por civis e a manipulação ineficiente de informações. Os objetivos do trabalho foram a identificação dos custos de pessoal envolvidos no processo de prisão e a predição das mudanças na taxa de utilização de pessoal como resultado de um re-projeto de alocação de pessoas. A principal barreira, segundo o autor, é a preparação necessária para a aplicação da simulação. O autor conclui que a aplicação da simulação na área de serviços corresponde a um grande potencial para obtenção de resultados de melhoria.

Ainda na área de serviços, exemplos podem ser encontrados de aplicação de simulação em bancos, lanchonetes, entretenimento, companhias de seguro, transporte, serviços médicos. Trabalhos como Ruohonen, Neittaanmäki e Teittinen *et al.* (2006) mostram o uso da simulação a eventos discretos em um departamento médico de emergência, enquanto Leal (2003) simula o processo de atendimento bancário.

Autores como Baines *et al.* (2004) procuraram formas de modelar o trabalho humano em simulação. De acordo com o trabalho dos autores, o efeito da idade e o efeito da fadiga de acordo com o horário do dia poderiam ser inseridos na simulação através de alguns parâmetros.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre a simulação a eventos discretos. Nesta visão geral, podem-se destacar os seguintes pontos:

- a) a importância atribuída ao modelo conceitual. Seguindo esta tendência, este trabalho apresentará no Capítulo 3 técnicas específicas para o modelamento conceitual, através do mapeamento do processo;
- b) a importância atribuída ao processo de verificação e validação. Este capítulo deu um destaque especial à validação através de técnicas estatísticas. Através da análise do trabalho de alguns autores (dentro e fora da área de simulação), este capítulo apresenta um fluxograma orientativo do processo de validação estatística. Posteriormente, este fluxograma será utilizado nesta pesquisa.

## **CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DE PROCESSOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE MAPEAMENTO**

Este capítulo irá apresentar uma visão geral sobre a modelagem de processos, destacando inicialmente os termos “modelagem” e “mapeamento”. O capítulo ainda apresenta algumas técnicas de modelagem de processos, como o fluxograma, ACD, IDEF (destacando o IDEF0 e IDEF3), DFD e UML. Após esta apresentação, o capítulo traz uma série de pesquisas utilizando as técnicas e propondo alterações e combinações no uso. Por fim, são apresentados os destaques do capítulo, no item considerações finais.

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O posicionamento deste capítulo logo após o Capítulo “Simulação a eventos discretos” tem como objetivo apresentar uma fundamentação teórica de forma a enriquecer uma das etapas da simulação, referente à confecção do modelo conceitual. Além disto, este capítulo justifica-se por estar diretamente relacionado a um dos objetivos específicos deste trabalho, que é a elaboração de uma técnica de modelagem conceitual voltada à simulação.

A análise da literatura abre espaço para uma discussão sobre os termos “modelagem de processos” e “mapeamento de processos”. Autores como Greasley (2006), Kumar e Phrommathed (2006), utilizam o termo “mapeamento de processo”, em seu trabalho de simulação. Os autores Fülcher e Powell (1999) aplicam a técnica do IDEF0, chamando de “técnica de mapeamento”. Os autores ainda utilizam o termo “*mapping business process*”.

Já autores como Thompson (1995), Perera e Liyanage (2000) defendem o uso de técnicas de “modelagem de processos”, beneficiando a qualidade dos modelos de simulação. Ryan e Heavey (2006) alertam que as ferramentas de “modelagem de processos” têm sido utilizadas para dar suporte às fases do processo de simulação anteriores à codificação computacional. Entretanto, nenhuma destas ferramentas foi desenvolvida especificamente para dar suporte à simulação.

Este trabalho considera que a modelagem de processos aborda técnicas cujo objetivo é a obtenção de um modelo que represente de forma satisfatória a realidade. Portanto, o uso de um fluxograma, por exemplo, corresponde a uma modelagem, porém de forma estática. Este tipo de representação diagramada (fluxograma, IDEF, DFD, entre outros) pode ser considerado uma modelagem através de mapeamento de processos. Seguindo esta linha de pensamento, está o trabalho de Aguilar-Savén (2004), afirmando que quando a análise do processo exige mecanismos mais sofisticados do que análises qualitativas ou modelos de diagramação estática, há a necessidade do uso de aspectos dinâmicos e funcionais. Neste caso, os usuários necessitam de um modelo que permita mais interação (como na simulação) para análises do tipo “o que aconteceria se”. Porém, existem casos onde o uso de técnicas e ferramentas com notação tipicamente diagramada já é considerado satisfatório.

O fato é que o termo “mapeamento de processos” tem sido trocado por “modelagem de processos”. Este fato pode ser observado no trabalho de Rosemann (2006), onde o autor afirma que a atual geração de analistas de processos de negócios prefere o termo “modelagem de processos” ao invés de “mapeamento”. Segundo o autor, a modelagem de processos aponta para técnicas mais disciplinadas, padronizadas, consistentes e mais “maduras” cientificamente. Surge então o termo BPM (*Business Process Modeling*).

Autores como Kalpič e Bernus (2006) consideram o BPM como uma abordagem para a gestão do conhecimento, que permite a transformação do conhecimento informal em conhecimento formal, facilitando sua externalização e compartilhamento.

O destaque para a etapa de modelagem conceitual, em projetos de simulação, é encontrado em trabalhos como Thompson (1995), Perera e Liyanage (2000), que afirmam que o uso de técnicas de modelagem aumenta a qualidade dos modelos de simulação e ainda reduz o tempo necessário para a construção destes modelos computacionais. Esta é a principal razão para muitos pesquisadores focarem seus trabalhos na obtenção de uma interligação entre as ferramentas de modelagem e processos de simulação.

### 3.2 TÉCNICAS DE MAPEAMENTO DE PROCESSOS

Existem várias técnicas de mapeamento de processos. Kettinger, Teng e Guha (1997) listaram mais de 100 em uma *survey* realizada.

Aguilar-Savén (2004) confirma que o processo de seleção da técnica ou ferramenta correta para modelagem de processos vem se tornando mais e mais complexo, não somente devido ao grande número de abordagens disponíveis, mas também devido à falta de um guia que explique e descreva os conceitos envolvidos nas diversas técnicas e ferramentas de modelagem.

Segundo pesquisa realizada por Aguilar-Savén (2004), em banco de dados como *Cambridge Scientific Abstracts-Internet Database Service, IEEE Xplore e Compendex by Engineering Information Inc.*, utilizando as palavras-chave “*business process modelling*” e/ou “*review*” ou “*framework*”, foram encontrados mais de 7000 revistas científicas e congressos desde 1985. A grande maioria dos artigos encontrados foram publicados em revistas e congressos das áreas de Sistema de Informações e Ciências da Computação.

De forma geral, Leal (2003) afirma que para iniciar a fase de mapeamento do processo torna-se importante o desenvolvimento de uma lista de atividades através da realização de entrevistas semi-estruturadas, que permitam aos participantes dos processos falarem aberta e claramente a respeito do seu trabalho diário. A pergunta inicial consiste em perguntar de forma direta ao participante: “o que você faz em seu trabalho?”.

Segundo Rosemann (2006), o analista de processos de negócios necessita muito mais do que avançadas e customizadas técnicas de modelagem. Ele necessita de métodos e habilidades para facilitar suas entrevistas e *workshops*. Para exemplificar este pensamento, o próprio autor faz o seguinte relato criativo:

(...) mesmo com o *Microsoft Word* oferecendo-me *templates*, auto-formas, corretor ortográfico, enciclopédia, etc., eu provavelmente nunca serei o próximo Dan Brown (o autor do *bestselling* ‘O código Da Vinci’) (ROSEMANN, 2006, p.252).

### 3.2.1 Fluxograma

Em definição apresentada em Aguilar-Savén (2004), fluxograma pode ser definido como uma representação gráfica formalizada de uma seqüência lógica programada, trabalho, processo de manufatura, ou estrutura em geral. Segundo a autora, não há uma data específica para sua origem. A facilidade do seu uso é um dos principais destaques.

Ainda segundo a autora, o melhor uso da técnica do fluxograma é quando este é utilizado para lidar com processos que necessitam um alto nível de detalhes. Entretanto, ele não é considerado bom para uma avaliação mais geral.

A Figura 3.1 ilustra um fluxograma.

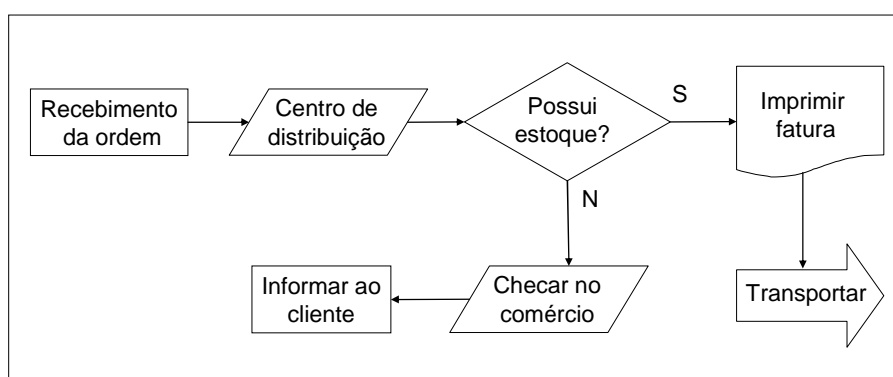


Figura 3.1 – Aplicação de fluxograma  
Fonte: Adaptado de Aguilar-Savén (2004)

Aguilar-Savén (2004) apresenta em seu trabalho uma comparação entre técnicas de modelagem. Segundo a autora, o fluxograma apresenta como ponto forte ao usuário a habilidade de comunicação, enquanto que para o modelador os pontos fortes são a flexibilidade da técnica e sua simplicidade. Em contrapartida, o ponto fraco da técnica para o usuário está no fato dela poder assumir grande extensão na representação de processos. O principal ponto negativo ao modelador é o fato de existirem diversas notações diferentes associadas à técnica.

Este excesso de notações também é discutido por Rosemann (2006), ao afirmar que fluxogramas de todos os tamanhos e formas têm sido popularizados em organizações.

O nome “fluxograma” envolve também, na maioria das vezes, a simbologia proposta por Barnes, em sua obra clássica *Motion and Time Study*, cuja primeira edição ocorreu em 1937. Neste caso, Barnes (1982) chama a técnica de mapa de processo.

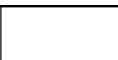





### 3.2.2 ACD (*activity cycle diagram*)

Trabalhos como Chwif, Paul e Barretto (2006) utilizam a técnica do diagrama de ciclo de atividades, cujo objetivo é claramente focado na simulação. Neste caso, observa-se que a modelagem do processo visa uma etapa da simulação direcionada à elaboração do modelo conceitual.

O ACD é uma técnica para a representação da interação das entidades dentro de um sistema. Segundo Chwif, Paul e Barreto (1999), em um ACD, as entidades alternam seu estado dentro de um ciclo, entre atividades e esperas.

Para Chwif e Medina (2006), o ACD é uma forma de modelagem das interações dos objetos pertencentes a um sistema. Os símbolos utilizados estão caracterizados no exemplo da Tabela 3.1. Exemplos de aplicação podem ser encontrados no referido trabalho de Chwif e Medina (2006).

Tabela 3.1 – Simbologia utilizadas no ACD.  
Fonte: Chwif e Medina (2006)

Entidade	Estado	Símbolo
Garfo	É utilizado	
	Esperando	
Filósofo	Comendo	
	Esperando pensar	
	Pensando	
	Esperando comer	

### 3.2.3 IDEF (*integrated definition methods*)

Segundo o NIST (1993), durante os anos 70, o *Program for Integrated Computer Aided Manufacturing (ICAM)*, da Força Aérea Norte Americana, buscou aumentar a produtividade da manufatura através de aplicação sistemática de tecnologia de computação. O *ICAM* identificou a necessidade de uma melhor análise e técnicas de comunicação para as pessoas envolvidas em programas de melhoria de produtividade em manufatura. Como resultado, o *ICAM* desenvolveu uma série de técnicas conhecidas como IDEF (*Integrated Definition Methods*). Estas técnicas foram definidas da seguinte forma:

- IDEF0 – utilizada para produzir um modelo funcional. Um modelo funcional é uma representação estruturada de funções, atividades ou processos dentro de um sistema modelado ou definida área;
- IDEF1 – utilizada para produzir um modelo de informações. Um modelo de informações representa a estrutura e a semântica das informações dentro de um sistema modelado ou definida área;
- IDEF2 – utilizada para produzir um modelo dinâmico. Um modelo dinâmico representa o comportamento, variando no tempo, das características de um sistema modelado ou definida área.

Em 1983, o *Integrated Information Support System* da Força Aérea Norte Americana incrementou a técnica de modelagem de informações do IDEF1 para a forma IDEF1X (IDEF1 estendido). O IDEF0 e o IDEF1X passaram a ser amplamente utilizados nos setores governamental, industrial e comercial.

Já em 1991, o *National Institute of Standards and Technology (NIST)* recebeu apoio do Departamento de Defesa Norte Americano para desenvolver um ou mais padrões de processamento de informações federais, através de técnicas de modelagem. As técnicas selecionadas foram o IDEF0 para modelagem funcional e o IDEF1X para modelagem de informações.

De acordo com Aguilar-Savén (2004), a necessidade de modelar atividades, dados e elementos dinâmicos de operações de manufatura resultou em uma seleção inicial por técnicas de projeto e análise estruturada (SADT - *Structured Analysis and Design Technique*). O SADT é considerado mais do que uma técnica, é uma metodologia utilizada como uma abordagem regimentada para analisar uma empresa. E é dentro destes princípios que as técnicas IDEF foram estabelecidas.

Ainda segundo a autora, a família IDEF é utilizada de acordo com diferentes aplicações. Para a modelagem de processos de negócios, as versões mais úteis são o IDEF0 e o IDEF3.

### 3.2.3.1 IDEF0 (*integration definition language 0*)

Para Aguilar-Savén (2004), o IDEF0 é uma técnica de modelagem utilizada para desenvolver representações gráficas estruturadas de processos ou sistemas complexos como empresas. Ele é utilizado para especificar modelos funcionais, do tipo “o que eu faço?”. Seu objetivo principal é mostrar atividades de nível mais alto, indicando as atividades principais, entradas, controles, saídas e mecanismos associados a cada atividade principal.

O IDEF0 possui elementos gráficos e textuais combinados, e que são apresentados de forma organizada e sistemática, visando obter entendimento sobre o sistema, suporte para análises, construção da lógica para potenciais mudanças, especificação de requerimentos e visualização da integração entre atividades. Um modelo IDEF0 é composto por uma série hierárquica de diagramas que gradualmente exhibe níveis de detalhe na descrição de funções e suas interfaces com o contexto do sistema.

Os componentes da sintaxe do IDEF0 são as caixas, setas, regras e diagramas. Caixas representam funções, definidas como atividades, processos ou transformações. Setas representam dados ou objetos relacionados às funções. Regras definem como os componentes são utilizados, e os diagramas definem um formato para a descrição de modelos graficamente e verbalmente. Os dois componentes principais da modelagem são as funções e os dados/objetos que inter-relacionam estas funções.

O IDEF0 trabalha com os seguintes elementos que se relacionam com as funções:

- entradas: representadas por setas; são dados ou objetos que são transformados pela função em saídas. As setas de entradas são ligadas pelo lado esquerdo, entrando na caixa de função;
- saídas: representadas por setas; são dados ou objetos produzidos pela função. As setas de saída são ligadas pelo lado direito, saindo da caixa da função;
- mecanismos: representado por setas; são os meios pelos quais a função é executada. As setas representando mecanismos são ligadas pelo lado de baixo com a caixa da função;
- controle: representado por setas; condições requeridas para produzir a saída correta. Dados ou objetos modelados como controles podem ser transformados pela função, criando saídas. As setas de controle são ligadas à caixa de função pelo lado de cima.

A Figura 3.2 representa estas setas de relacionamento.

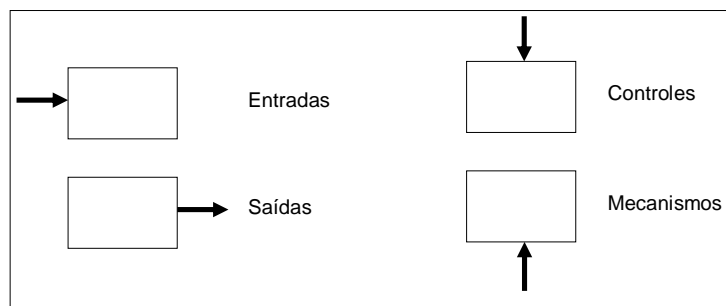


Figura 3.2 – Setas de relacionamento com as funções, segundo as regras do IDEF0

Várias funções do modelo podem ser desempenhadas concorrentemente, se as condições necessárias forem satisfeitas. Uma saída de uma caixa pode gerar algum ou todos os dados e objetos necessários para a ativação de uma ou mais caixas, como mostra a Figura 3.3. Observa-se que as caixas são organizadas normalmente de forma diagonal, do lado superior esquerdo para o lado inferior direito, em uma configuração escada.

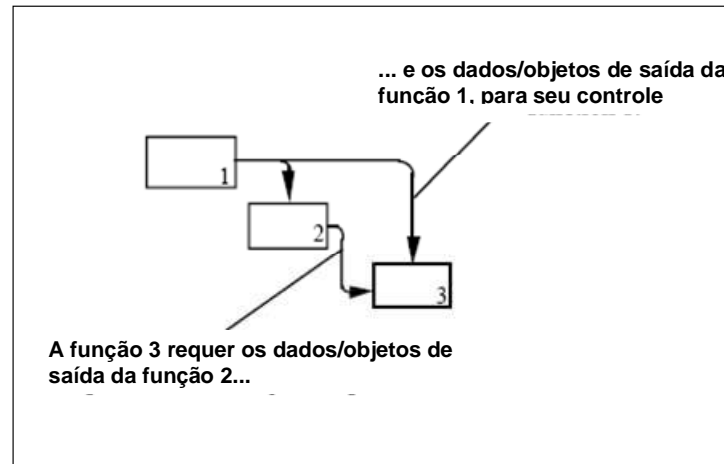


Figura 3.3 – Saídas gerando entradas e controles, no IDEF0

A Figura 3.4 exemplifica a aplicação da modelagem IDEF0. Hernandez-Matias *et al.* (2008) confirmam que, analisando as diferentes abordagens IDEF, o IDEF0 é a versão mais amplamente utilizada em análise na manufatura. Aguilar-Savén (2004) ainda destaca na técnica o fato das regras serem mais rígidas, o que facilita a modelagem e sua interpretação. Esta característica já não é encontrada em fluxogramas, como visto anteriormente.

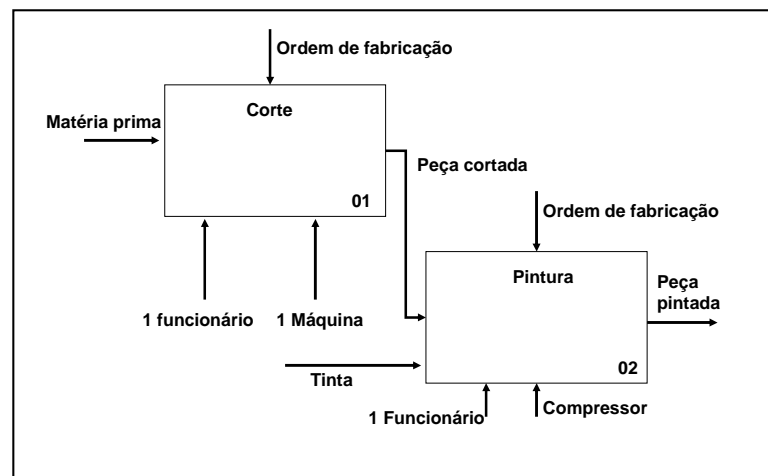


Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do IDEF0

### 3.2.3.2 IDEF3

De acordo com Ryan e Heavey (2006), a técnica de modelagem de processos IDEF3 permite a captura e representação com elementos gráficos, tanto para a

transição de estados em um sistema a eventos discretos, como para a representação das atividades associadas com cada estado de transição.

Uma das características do IDEF3, ao contrário do IDEF0, é o fato de os eventos ou atividades serem descritos na verdadeira ordem na qual estes ocorrem, levando em consideração as precedências temporais.

O IDEF3 ainda apresenta-se em dois modos: descrição do fluxo do processo e descrição das transições de estado dos objetos, como mostra o trabalho de Mayer *et al.* (1995). Segundo os autores, no modo descrição do fluxo de processo, o objetivo é demonstrar como “as coisas” trabalham na organização. Já no modo descrição das transições, o objetivo é resumir as transições possíveis de um objeto ao longo do processo.

Ainda segundo Mayer *et al.* (1995), o principal símbolo do IDEF3 é a unidade de comportamento UOB (*Unit of Behavior*), representado por uma caixa na Figura 3.6. Além disso, o IDEF3 registra o aspecto temporal através de lógicas representadas nas chamadas “junções”, como mostra a Figura 3.5.

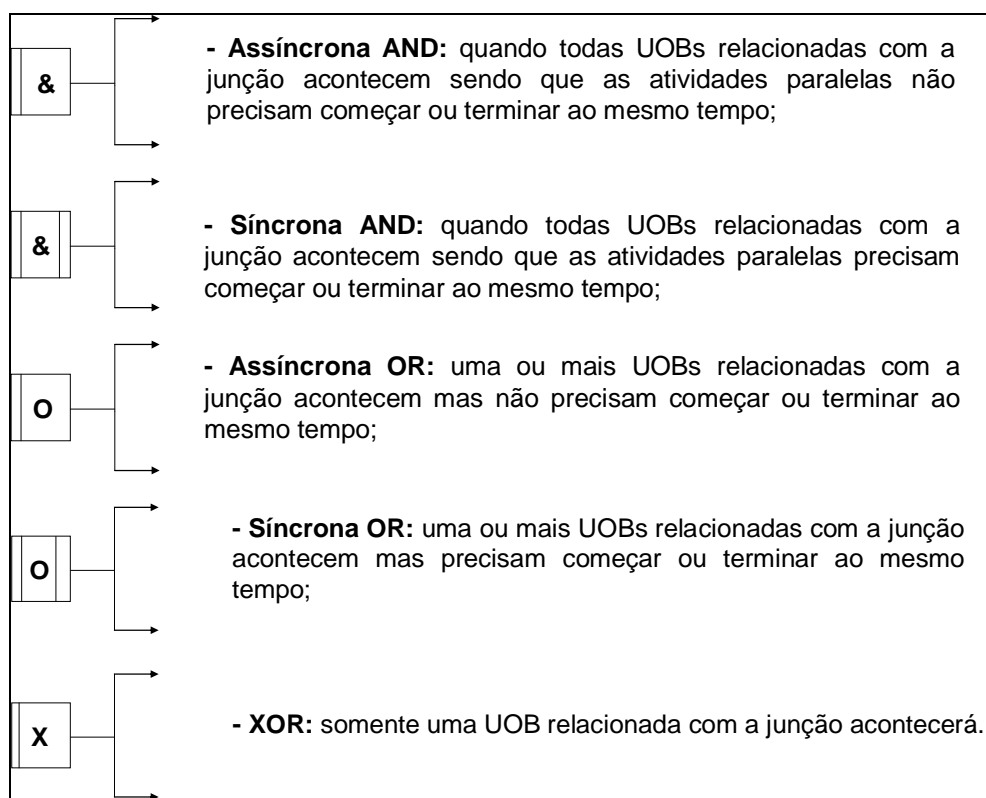


Figura 3.5 – Junções lógicas do IDEF3.  
Fonte: Adaptado de Mayer *et al.* (1995)

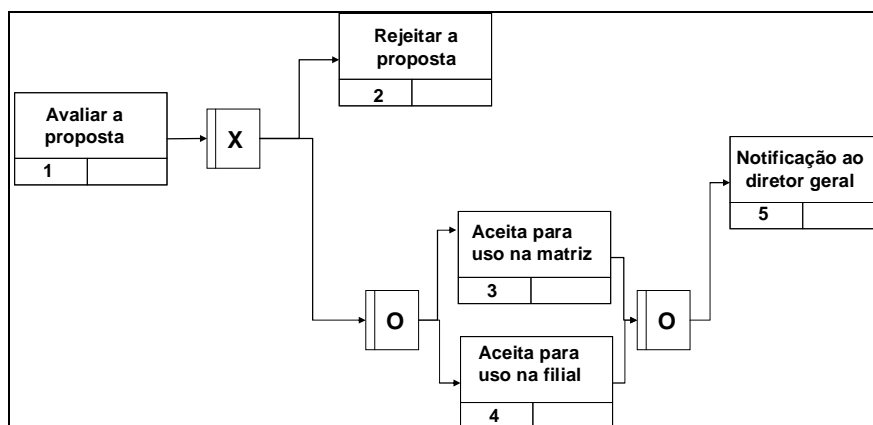


Figura 3.6 – Exemplo de aplicação do IDEF3

No modo de descrição das transições, um objeto muda do estado A para o estado B, mediante um processo de transformação descrito na UOB, como mostra a Figura 3.7.

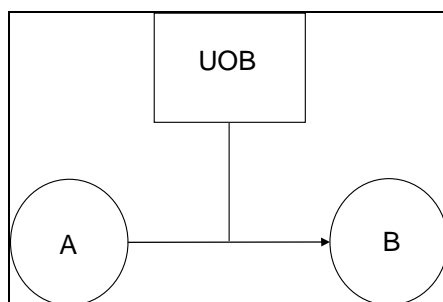


Figura 3.7 – IDEF3 no modo de descrição das transições

Ryan e Heavey (2006) apontam alguns pontos negativos do IDEF3, afirmando que a modelagem do controle de um sistema discreto não é representado graficamente. Esta técnica também não permite a representação gráfica dos recursos inseridos no fluxo do processo ou na rede de transição de estados dos objetos.

No caso específico da simulação, os autores afirmam que estes recursos são muito importantes na modelagem e simulação de um sistema a eventos discretos, como no caso das filas, não representadas nesta técnica.

Tseng, Qinhai e Su (1999) fizeram algumas simplificações e adaptações na técnica, visando a sua utilização no caso específico das operações de serviço. O IDEF3 adaptado no referido trabalho considera a participação do cliente no serviço,

descrevendo o processo por meio de diagramas e informações adicionais para cada atividade. Neste caso, denominou-se a UOB de CBU (*Customer Behavior Unit*).

Aguilar-Savén (2004) destaca na técnica a idéia de dinamismo e o padrão rígido das regras para seu uso.

### 3.2.3.3 Outras técnicas da família IDEF

Segundo definição de Aguilar-Savén (2004), o IDEF1 é utilizado para modelar informações, capturando o ponto de vista conceitual das informações das empresas. O IDEF1X é utilizado para modelagem de dados e é baseado em um modelo de relacionamento de entidades. Ele é, portanto, um método de projeto para banco de dados.

Já o IDEF2 é definido como projeto de modelos de simulação, e é utilizado para representar a variação do tempo e comportamento de recursos em um sistema de manufatura. Embora o método IDEF2 seja bastante eficaz na descrição de um sistema dinâmico, a elevada complexidade dos modelos utilizados torna a utilização deste método impraticável em sistemas grandes. O IDEF2 foi abandonado ainda nos primeiros anos de vida sendo substituído na prática pelas técnicas IDEF0 e IDEF3 utilizadas em conjunto, e acabou por ser ultrapassado por um mercado de ferramentas de modelação cada vez mais vasto.

O IDEF4 é um método de projeto orientado a objetos e foi desenvolvido para dar suporte ao paradigma do objeto orientado. Ele suporta projetos com aplicações em linguagem C. Finalmente, o IDEF5 é um método de auxílio à criação, modificação e manutenção ontológica. Ontologia é a parte da filosofia cuja meta é dividir o mundo em diferentes objetos.

### 3.2.4 DFD (*data flow diagrams*)

Segundo Aguilar-Savén (2004), o DFD representa diagramas que mostram o fluxo de dados ou informações de um local ao outro. Os DFDs descrevem os processos

mostrando como estes se conectam através de banco de dados e como estes processos relatam aos usuários e ao mundo externo. A técnica foi desenvolvida no início dos anos 60 por Yourdon.

O DFD somente mostra o fluxo de dados, e não de materiais. Por esta técnica, é identificado como as informações entram e saem dos processos, quais atividades alteram as informações, onde as informações são armazenadas nos processos e a função organizacional a qual a atividade pertence (ALTER, 1999). A Figura 3.8 representa uma aplicação de DFD.

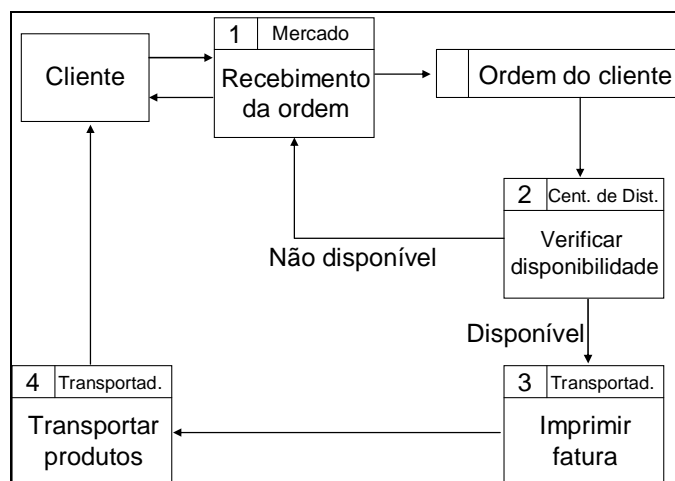


Figura 3.8 – Uso do DFD sobre o mesmo processo representado na Figura 3.1  
Fonte: Adaptado de Aguilar-Savén (2004)

Aguilar-Savén (2004) apresenta como ponto positivo ao usuário da técnica DFD a facilidade no entendimento. Por outro lado, a autora cita o fato de a ferramenta apresentar somente o fluxo de dados como um ponto fraco. Do ponto de vista do modelador, a autora destaca a facilidade de se verificar e desenhar a simbologia.

Vale destacar que, apesar de pesquisas como de Aguilar-Savén (2004) apontarem pontos fortes e fracos nas técnicas, cada uma delas possui um determinado objetivo. O peso dado em um aspecto fatalmente causa um empobrecimento de outro. Percebe-se que não há uma técnica completa de mapeamento, mas sim técnicas com fins específicos.

### 3.2.5 UML (*unified modeling language*)

A UML, segundo Booch, Rumbaugh e Jacobson (2005), é uma linguagem gráfica para visualização, especificação, construção e documentação de artefatos de sistemas complexos de *software*. A UML proporciona uma forma padrão para a preparação de planos de arquitetura de projetos de sistemas, incluindo aspectos conceituais tais como processos de negócios e funções do sistema, além de itens concretos como as classes escritas em determinada linguagem de programação, esquema de banco de dados e componentes de *softwares* reutilizáveis.

A UML não está restrita à modelagem de *software*. Na verdade, a UML é suficientemente expressiva para modelar sistemas que não sejam de *software*, como o fluxo de trabalho em um sistema, a estrutura e o comportamento de sistemas de saúde e o projeto de *hardware*, como mostra o trabalho de Leal (2003).

## 3.3 PESQUISAS EM TÉCNICAS DE MODELAGEM/MAPEAMENTO

A literatura apresenta trabalhos cujo objetivo é a comparação de técnicas de modelagem. Além de Aguilar-Savén (2004), já citada neste capítulo, Carnaghan (2006) também compara técnicas de modelagem, como o DFD, fluxogramas, IDEF0, IDEF3, UML, além de diagramas de processos de negócios.

Scaff (2007) realizou um mapeamento de processos de gestão de uma universidade pública, através das técnicas DFD e UML. O foco do trabalho se manteve no fluxo de informações entre os processos.

Algumas pesquisas publicadas apresentam melhorias e inovações nas técnicas IDEF. Hernandez-Matias *et al.* (2008) propõem um método baseado em uma modificação nas técnicas IDEF. Uma ferramenta computacional foi desenvolvida para se conectar com o modelo IDEF, criando automaticamente um banco de dados de relação através de um conjunto de algoritmos. Os autores ainda citam outras abordagens teóricas para contornar as limitações de técnicas de modelagem, como redes Petri e lógica *Fuzzy*.

Rashid e Ismail (2007) utilizam o IDEF0 e demonstram como calcular a eficiência do processo e a qualidade das saídas baseado na qualidade das entradas, controles e ferramentas utilizadas ao longo do processo. Para ilustrar e validar a abordagem proposta, tal idéia foi aplicada em um estudo de caso de processo de desenvolvimento de produto, utilizando-se incerteza nas entradas e nos recursos.

Já autores como Howard e Lewis (2003), Ping e Yu-Cheng (2004), mostram aplicações de IDEF para a elaboração de sistemas de gestão do conhecimento baseado em banco de informações.

Ma, Zhang e Ma (2002) desenvolveram uma abordagem com extensões do IDEF1X para representar informações *fuzzy*. Este modelo pode ser convertido em um modelo de dados relacionais *fuzzy* de acordo com algumas regras de transformação. Porém, a aplicação real de rede Petri e lógica *fuzzy* para usuários finais, segundo os autores, é considerada difícil devido à complexidade destas técnicas.

Kim *et al.* (2003) desenvolveram uma ampla revisão sobre técnicas IDEF e UML. Eles identificaram similaridades entre objetos utilizados nestas duas técnicas. Eles observaram que o desenvolvimento combinado de modelos IDEF e UML tem o poder de unir a descrição de sistemas de manufatura e o comportamento de elementos empresariais como fornecedores, produtos, máquinas, pessoas, equipes, etc.

Outras técnicas de modelagem podem ser encontradas. Ming e Frank (2001) apresentam uma modelagem de processo via rede Petri. Segundo os autores, a técnica é um método poderoso para modelagem de análise de sistemas que apresentam paralelismos, sincronizações, valores não determinísticos e características de compartilhamento de recursos.

Trabalhos como Bosil, Giaglis e Hlupic (2000) avaliam a conveniência do uso conjunto de abordagens do IDEF0 em conjunto com redes Petri na modelagem de processos.

Kumar e Phrommathed (2006) apresentam em seu trabalho a demonstração da aplicação do mapeamento do processo integrada à simulação, utilizando como ferramenta um *software*. Foi utilizado o *Microsoft Visio*, com interface ao *Microsoft Excel* e ao *Arena*. A experiência obtida no caso prático indicou que a combinação do mapeamento do processo e análise de dados com a simulação é benéfica.

Ainda utilizando técnicas de mapeamento com simulação, Greasley (2006) apresenta um caso prático, demonstrando o uso de uma abordagem baseada na análise do processo de mudanças, considerando a implementação de um sistema de informação para o registro de acidentes nas estradas, para a força policial do Reino Unido. As técnicas utilizadas foram o mapeamento de processo e o BPS (*Business Process Simulation*).

Um grande número de pesquisadores tem mostrado que os métodos da abordagem IDEF podem ser utilizados no suporte à simulação. Montevechi *et al.* (2008) combinam as técnicas IDEF0, fluxograma e SIPOC para gerar um modelo conceitual mais próximo às necessidades de um modelo computacional.

Já Perera e Liyanage (2000) utilizaram o IDEF0 e o IDEF1X para auxiliar na coleta de dados de entrada para a simulação de sistemas de manufatura. Outros pesquisadores como van Rensburg e Zwemstra (1995), Al-Ahmari e Ridgway (1999), demonstraram o uso do IDEF0, IDEF1X e IDEF3 para auxiliar na simulação de sistemas de manufatura.

Ainda visando à simulação, Ryan e Heavey (2006) afirmam que as técnicas de modelagem não foram desenvolvidas objetivando a simulação. Desta forma, os autores propõem uma nova ferramenta para contornar as lacunas existentes nas técnicas de modelagem: o SADs - *Simulation Activity Diagrams*. Esta técnica foi desenvolvida especificamente para dar suporte às fases de pré-codificação do projeto de simulação, com a missão de contornar as lacunas existentes nas propostas das demais técnicas de modelagem de processos, no que diz respeito ao suporte à simulação.

Leal *et al.* (2007) aplicam o IDEF0 na fase de modelamento conceitual da simulação a eventos discretos. Nesta aplicação, os autores propõem alguns símbolos que incrementam o poder do IDEF0 no auxílio à simulação.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre a modelagem de processos através das técnicas de mapeamento. Destacam-se neste capítulo:

- a) a discussão apresentada sobre o uso dos termos “mapeamento” e “modelagem”. O capítulo mostra a opinião de alguns autores da área, quanto ao uso destes termos. Neste trabalho, utilizou-se a expressão “modelagem de processos através de técnicas de mapeamento”. Destaca-se ainda o uso da expressão “modelagem de processos de negócios” (BPM);
- b) a apresentação de algumas técnicas de modelagem, em especial o IDEF0 e o IDEF3. Estas técnicas serão utilizadas neste trabalho na fase de modelagem conceitual;
- c) a argumentação encontrada na literatura de que, embora o IDEF2 tenha como objetivo a simulação, seu uso é pouco relatado, sendo substituído na prática pelo IDEF0 e IDEF3;
- d) o número de pesquisas propondo alterações ou mesmo formas combinadas de utilização das diversas técnicas de modelagem de processos.

## **CAPÍTULO 4 – PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS**

Este capítulo irá apresentar uma visão geral sobre o uso de projeto de experimentos em simulação. O capítulo traz algumas definições para experimento, além de algumas etapas designadas ao projeto de experimentos. O capítulo discute ainda as vantagens e a aplicabilidade do projeto de experimentos em simulação.

Alguns conceitos serão apresentados, como replicação e repetição, aleatorização, fator, resposta, efeito, interação. O capítulo ainda apresenta o conceito de projetos fatoriais, além de pesquisas sobre a aplicação do projeto de experimentos em simulação. Por fim, serão apresentados os destaques do capítulo no item considerações finais.

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Segundo Cox e Reid (2000), a palavra experimento é utilizada de forma bastante precisa para indicar uma investigação onde o sistema sob estudo está sob o controle do investigador. Ao contrário, para um estudo observacional, algumas características estarão fora do controle do investigador.

No que se refere à simulação, Kleijnen (1995) afirma que inferências sobre o problema analisado são obtidas através da condução de experimentos no modelo computacional, na fase de experimentação.

De acordo com Montgomery (2005), experimento é um teste, ou uma série de testes, nos quais mudanças propostas são aplicadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, para então se observar e identificar as mudanças ocorridas nas variáveis de saída.

Uma grande variedade de abordagens, métodos e técnicas de análise, conhecidas coletivamente como projeto de experimentos (ou projeto experimental), têm sido aplicadas e documentadas. Segundo Kelton (1999), um dos principais objetivos do projeto de experimentos é estimar como as alterações nos fatores de entrada afetam os resultados ou respostas do experimento.

O projeto de experimentos (DOE – *Design of Experiments*), segundo Montgomery (2005), refere-se ao processo de planejamento de experimentos de forma que dados apropriados possam ser analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Em seu trabalho, o autor propõe alguns passos para um planejamento do experimento, como mostra a Figura 4.1.

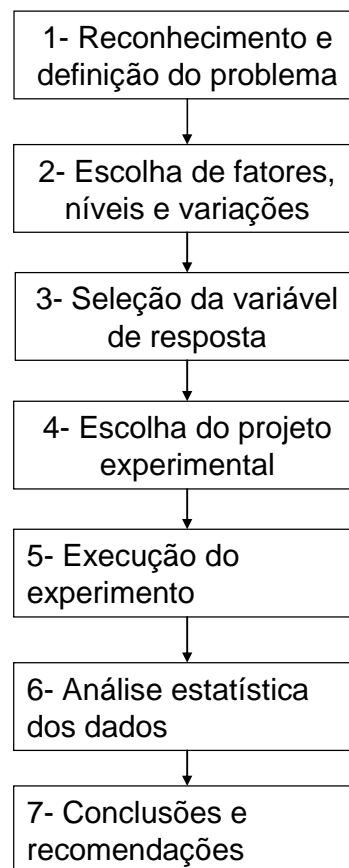


Figura 4.1 – Passos propostos para a realização de um projeto de experimentos.  
Fonte: Montgomery (2005)

Montgomery (2005) destaca ainda que, na prática, os passos 2 e 3, representados na Figura 4.1, podem ser realizados de forma simultânea ou em ordem contrária.

Cox e Reid (2000) destacam a longa história dos projetos de experimentos, incluindo trabalhos nos contextos agrícolas e ciências biológicas. Estas idéias foram posteriormente levadas à indústria.

Resumindo então a importância do projeto de experimentos, Sanchez (2006) afirma que um experimento bem projetado permite ao analista examinar muito mais

fatores do que um experimento sem um bom projeto, além de constatações que não poderiam ser feitas pela abordagem de tentativa-e-erro.

## 4.2 O PROJETO DE EXPERIMENTOS NA SIMULAÇÃO

Em simulação, o uso do projeto de experimentos, ou DOE (*design of experiments*) tem se mostrado de grande impacto no auxílio à tomada de decisões. Kelton (1999) afirma que o planejamento de experimentos simulados é de grande ajuda, reduzindo tempo e esforços através do fornecimento de caminhos eficientes para estimar os efeitos das mudanças dos *inputs* do modelo sobre os *outputs* do modelo.

Para Kleijnen *et al.* (2005), os muitos praticantes de simulação podem obter mais de suas análises utilizando teoria estatística nos projetos de experimentos. Os benefícios do uso do DOE incluem, entre outros, a melhora no desempenho de sistemas através da busca de uma boa solução para a sua configuração, evitando uma abordagem de tentativa-e-erro. Infelizmente, segundo os autores, poucos praticantes de simulação parecem estar atentos às possibilidades geradas com o uso de projetos de experimentos em simulação.

Uma questão interessante apontada pelos autores é que pesquisas relacionadas a projeto de experimentos são frequentemente encontradas em revistas especializadas, mas raramente lidas por praticantes de simulação.

Kleijnen *et al.* (2005) apresentam ainda uma opinião explicando este fato: a maioria destes projetos foi originalmente desenvolvida para experimentação em mundo real, ao invés de especificamente serem desenvolvidas dentro das especificidades da simulação.

Pode-se perceber que obras clássicas em DOE, como Box, Hunter e Hunter (1978), Box e Draper (1987), Montgomery (2005), Myers e Montgomery (2002), focam não nas necessidades das análises de simulação, mas nas questões práticas em experimentos conduzidos no mundo real.

Já obras de simulação como Law e Kelton (2000) e Banks *et al.* (2005), apesar de discutir vários tópicos do assunto, demonstram o DOE aplicando-o em poucos

problemas. Kleijnen *et al.* (2005) alertam que os problemas de DOE encontrados em livros textos de simulação não demonstram, na sua maioria, as possibilidades de uso do projeto de experimentos.

Kleijnen (1998) já afirmava que, após a seleção da combinação dos fatores, o programa de simulação deve ser executado (ou rodado) para estas combinações. Após, o DOE analisa os resultados dos dados de entrada-saída do experimento, para se gerar conclusões sobre a importância dos fatores. Na simulação isto é chamado de análise *what-if*, ou “o que aconteceria se”. No uso do DOE, o autor afirma que os fatores são selecionados por intuição, conhecimento prévio do sistema ou por gosto próprio. Os fatores ignorados são assumidos como não importantes.

A experimentação através da simulação apresenta algumas vantagens peculiares sobre os experimentos físicos, industriais ou de laboratórios (LAW e KELTON, 2000):

- através da simulação é possível controlar fatores que na realidade são incontroláveis, tal como a taxa de chegada de clientes;
- em simulação é possível controlar a origem básica de variação diferente da situação em experimentos físicos;
- a aleatorização em experimentos de simulação não é necessária considerando que o gerador de números aleatórios esteja funcionando adequadamente.

Uma das vantagens apontadas por Kleijnen *et al.* (2005), no que se refere à experimentação simulada, é que em experimentos no mundo real, tipicamente somente um pequeno número de fatores é variado. É impraticável, ou mesmo impossível, tentar controlar mais de 10 fatores; muitas publicações de experimentos relatam trabalhos com menos de 5. O que se percebe é que, em experimentos simulados, o número de fatores é bem maior.

### 4.3 CONCEITOS UTILIZADOS EM EXPERIMENTOS SIMULADOS

Faz-se necessário a apresentação de alguns conceitos envolvidos no planejamento de experimentos, e devidamente adaptados a projetos de simulação.

### 4.3.1 Replicação e Repetição

Os termos “replicação” e “repetição” podem ser utilizados de forma errônea. Utilizando a definição de Montgomery (2005), entende-se por replicação a realização do todo o experimento básico, novamente. O uso de replicações permite obter uma estimativa do erro experimental, que se torna uma unidade básica de medida para determinar quando as diferenças observadas nos dados são estatisticamente significantes. A replicação ainda permite obter uma estimativa mais precisa do efeito de um fator no experimento.

Para Kleijnen *et al.* (2005), ao considerar uma simulação estocástica, deve-se utilizar replicatas (ou replicações) para simular o mesmo cenário. Estas replicatas são provenientes de pseudo-números randômicos.

Já a repetição da medição ocorre quando, por exemplo, a mesma amostra é medida diversas vezes ou quando diversas amostras são medidas para uma mesma configuração de parâmetros ou experimento.

Segundo esta definição de Montgomery (2005), pode-se constatar que, em simulação de modelos estocásticos, torna-se interessante realizar replicações. Neste caso, a variável de resposta admitirá um conjunto de dados, que pode ser analisado segundo uma distribuição.

Porém, não há sentido em repetir a medida, uma vez que esta leitura é realizada pelo próprio *software*. A repetição busca estimar o erro de medição, provinda do instrumento ou mesmo da pessoa que faz a leitura.

### 4.3.2 Aleatorização

A aleatorização é o pilar de apoio para o uso de métodos estatísticos no planejamento de experimentos. Por aleatorização entende-se que tanto a designação do material para a experiência quanto a ordem de realização dos experimentos ou testes são determinados aleatoriamente (MONTGOMEY, 2001).

A execução dos experimentos em campo ou laboratório indica que a realização ocorra em ordem aleatória. Este, aliás, é um problema árduo aos experimentos físicos. Segundo Kelton (1999), pode-se dispensar esta aleatoriedade no caso de experimentos simulados, visto que cada rodada na simulação utiliza um gerador de números pseudo-aleatórios.

### 4.3.3 Fatores e níveis

Fatores são os parâmetros de entrada e as considerações estruturais que compõem um modelo. Segundo Kleijnen (1998), o fator é um parâmetro, uma variável de entrada ou um módulo de modelo de simulação. Por definição, os fatores são alterados durante um experimento. Conseqüentemente um fator toma no mínimo dois níveis ou valores durante o experimento.

Os fatores podem ser tanto quantitativos quanto qualitativos. Fatores quantitativos assumem valores numéricos enquanto fatores qualitativos representam tipicamente considerações estruturais que não são quantificadas naturalmente (LAW e KELTON, 2000). Os fatores assumirão valores de acordo com seus níveis. Cox e Reid (2000) destacam que é comum no estudo de um número grande de fatores a escolha de dois níveis, chamados de “nível alto” e “nível baixo”, ou “nível +” e “nível –”. Isto se dá no intuito de manter o tamanho do experimento em padrões satisfatórios.

Segundo Chung (2004) os níveis são as possíveis variações consideradas para cada fator, como por exemplo o fator priorização de seqüenciamento, com os níveis FIFO e LIFO. Kleijnen *et al.* (2005) definem que a combinação dos níveis de todos os fatores forma um cenário.

Em modelos de simulação, os níveis escolhidos para cada fator devem permitir que seus efeitos sejam programados no modelo. Para exemplificar esta questão, pode-se propor a seguinte situação: um determinado fator que se deseja experimentar corresponde à possibilidade de se utilizar um funcionário experiente (nível alto) ou um funcionário novato (nível baixo), verificando assim o impacto na taxa de produção diária. Em um modelo de simulação, o modelador deve conhecer, a priori, qual variável será afetada com a mudança dos níveis. Desta forma, o modelador deve

decidir por qual distribuição utilizar na variável tempo de operação, caso o funcionário seja experiente ou novato. Em um experimento não simulado, esta definição prévia não é necessária.

A escolha no número de fatores e número de níveis é fortemente influenciada pelo esforço gerado em se experimentar todas as alternativas geradas. Pode-se dizer que:

$$\text{Número total de alternativas} = (\text{número de níveis})^{\text{número de fatores}} \quad (4.1)$$

Os fatores ainda podem ser classificados em controláveis ou incontroláveis, dependendo de quando eles representam opções de ação para gerentes dos sistemas reais correspondentes. Montgomery (2005) destaca esta questão, conforme mostra a Figura 4.2.

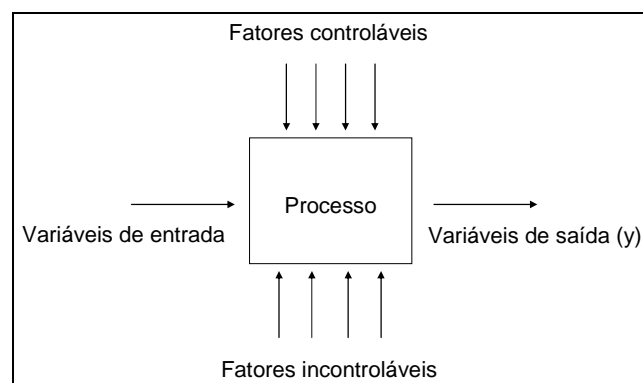


Figura 4.2 – Fatores controláveis e incontroláveis, afetando o processo.  
Fonte: Montgomery (2005)

Entende-se por fatores controláveis, segundo Montgomery (2005), os fatores cujos níveis podem ser fixados pelo experimentalista. Já um fator incontrolável, porém mensurável, pode ser analisado através de um processo chamado de análise de covariância, usado frequentemente para compensar seus efeitos. Quando um fator varia naturalmente e incontrolavelmente no processo, e pode ser, de alguma forma, controlado pelo experimentalista, é chamado de fator de ruído. Em tais situações, o objetivo é encontrar uma disposição de fatores controláveis que minimizem a

variabilidade transmitida pelos fatores de ruído. Este processo é chamado de projeto robusto.

Sobre esta questão, Kelton (1999) afirma que, em modelos de simulação, todos os fatores de entrada são controláveis, independente do fato destes fatores, na realidade, serem controláveis. Ainda nesta linha de pensamento, Barton (2002) também afirma que os ruídos raramente aparecem em modelos de simulação, pois se tem controle sobre todos os fatores.

#### **4.3.4 Resposta**

Segundo Kelton (1999), torna-se interessante estimar como uma alteração em um fator de entrada afeta a medida de um dado de saída da simulação, ou mesmo o quão sensível uma saída é em relação a mudanças em um dado de entrada (fator).

Resposta ou variável de resposta é a medida de desempenho ou saída do modelo de simulação (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2000; LAW e KELTON, 2000), ou seja, os resultados obtidos de uma variável de saída de interesse para o estudo. As variáveis de resposta descrevem como o sistema responde para uma dada configuração de fatores.

Em *softwares* de simulação, os valores da variável de resposta podem ser armazenados e exibidos após a simulação, através de relatórios do próprio *software*, ou mesmo exibidos durante a simulação, a cada alteração ocorrida. Estes valores ainda podem ser exportados para outros *softwares*, na forma de planilhas, como o *Microsoft Excel*.

#### **4.3.5 Efeito**

O efeito de um fator é definido como a mudança gerada na resposta produzida pela alteração do nível do fator. Segundo Montgomery (2005), o termo efeito principal é frequentemente utilizado porque se refere aos fatores de interesse primários no experimento.

O efeito será definido após a realização dos experimentos. Em simulação, os valores obtidos da variável de resposta devem ser analisados estatisticamente, para se determinar os efeitos de cada fator.

#### **4.3.6 Interação**

Montgomery e Runger (2003) dizem que há interação quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Assim, a interação faz com que a resposta à aplicação de dois tratamentos não seja a mera soma das respostas a cada tratamento.

Chung (2004) define interação como o evento que ocorre quando os fatores apresentam algum tipo de sinergia. Pode-se verificar que o efeito da soma dos fatores pode ser superior que a soma do efeito isolado de cada um.

### **4.4 PROJETOS FATORIAIS**

Para Chung (2004) a escolha do projeto experimental depende dos objetivos do projeto original de simulação, definidos na fase de formulação do problema.

Recebem destaque na área de projetos de experimentos os projetos fatoriais. Segundo Cox e Reid (2000), os projetos fatoriais são experimentos caracterizados pela definição de fatores, especificados por um certo número de níveis, geralmente pequeno. Um experimento fatorial completo consiste em um igual número de replicações para todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. Pode-se citar como exemplo o fator “temperatura” com 3 níveis, o fator “concentração” e o fator “pressão” com 2 níveis cada. Têm-se então 12 experimentos a se realizar ( $3 \times 2 \times 2$ ), e pelo menos 24 experimentos para uma estimativa independente do erro, através da replicação (imaginando neste caso a execução de cada um dos doze experimentos duas vezes).

Quando o experimento envolve o estudo dos efeitos de dois ou mais fatores, a estratégia mais eficiente é o planejamento fatorial. Nesta estratégia, os fatores são

variados juntos e não um por vez, ou seja, em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis são investigadas (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Chung (2004) esquematiza o projeto fatorial  $2^k$  (2 níveis com k fatores) como mostra a Figura 4.3.

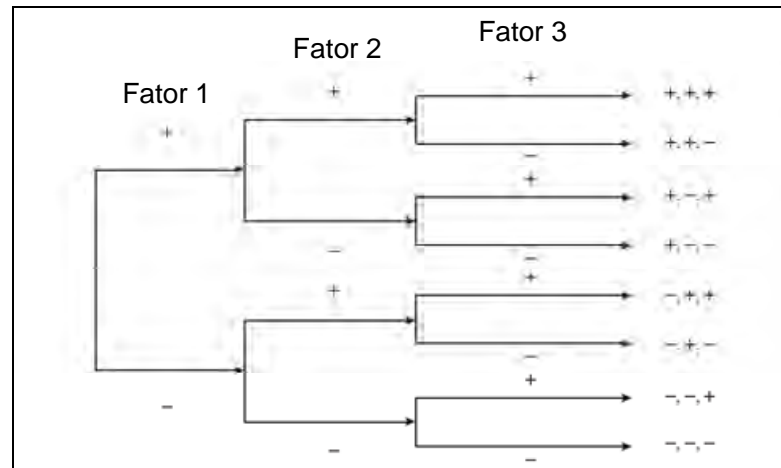


Figura 4.3 – Projeto fatorial  $2^k$ .

Fonte: Chung (2004)

O planejamento fatorial completo de dois níveis ou fatorial  $2^k$  é o tipo de planejamento no qual se define para cada fator dois níveis de valores, nível alto e nível baixo, e testa-se cada combinação de fatores (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2000).

De acordo com Sanchez, Moeenib e Sanchez (2006), muitos estudos na área de gestão de operações são realizados utilizando o projeto fatorial completo devido à sua relativa simplicidade, além do fato de permitir ao analista identificar as interações entre os fatores, assim como os efeitos principais.

Para Cox e Reid (2000), as vantagens do uso de um fatorial completo se dão na maior eficácia em estimar os efeitos principais dos fatores sob a variável em análise e, principalmente, a definição da interação entre todos os fatores. Uma desvantagem do uso do fatorial completo se dá na quantidade de tempo e de experimentos a serem realizados.

Esta dificuldade do fatorial completo, no caso do número de fatores tornar-se moderadamente grande, é retratada também por Kelton (1999). Segundo o autor, o

número de rodadas tende a explodir, devido à relação ser exponencial, como mostra a equação (4.1) deste trabalho.

Para experimentos com um grande número de fatores sendo considerado, o fatorial completo resulta em um número extremamente grande de combinações para serem testadas. Nesta situação, o planejamento fracionário é usado para estrategicamente selecionar um subconjunto de combinações com o objetivo de identificar os fatores com pouca ou nenhuma importância no desempenho do sistema (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2000).

Segundo Law e Kelton (2000), o planejamento fatorial fracionário fornece um meio de obter boas estimativas somente dos efeitos principais e talvez das interações de segunda ordem, mas em uma fração do esforço computacional requerido por um planejamento fatorial completo  $2^k$ . Ainda segundo os autores, um planejamento fatorial fracionado é construído selecionando um subconjunto de tamanho  $2^{k-p}$  de todos os pontos possíveis de um planejamento  $2^k$  e executando a simulação somente para os pontos escolhidos.

Conclui-se então que um projeto fatorial fracionado  $2^{k-p}$  explora os  $k$  fatores (sendo cada um com dois níveis) com somente  $2^{k-p}$  rodadas.

Projetos fatoriais e fatoriais fracionados são discutidos em trabalhos como Box, Hunter e Hunter (1978) e Montgomery (2005).

#### 4.5 ADEQUABILIDADE DO MODELO

Segundo Montgomery (2005), um modelo, adequadamente formulado, deve possuir resíduos normalmente distribuídos, além de serem não correlacionados. Entende-se por resíduo de um modelo (ou erro do modelo) a diferença entre uma observação e o seu valor estimado (ou ajustado) a partir do modelo estatístico estudado.

Uma anomalia que ocasionalmente ocorre é o da variação não constante, ou seja, a variância das observações aumenta com o incremento da magnitude das observações. A variância não constante pode ser observada quando os dados não são normalmente distribuídos, seguindo, portanto, distribuições assimétricas.

Os resíduos devem apresentar comportamentos aleatórios quando dispostos em uma ordem temporal. Se qualquer padrão não-aleatório for identificado nestes tipos de gráficos, uma transformação de dados (Log, Raiz Quadrada, Box-Cox) na resposta Y deve ser realizada. A tendência de se ter resíduos positivos ou negativos indicam uma correlação positiva, o que implicaria na violação da hipótese de independência dos resíduos. Uma aleatorização apropriada do experimento é um bom procedimento para a garantia dessa independência.

Como em teoria modelos de simulação garantem esta aleatorização, desde que com o gerador de números pseudo-aleatórios funcionando corretamente, espera-se obter esta propriedade nos resíduos observados.

A utilização dos resíduos padronizados gera mais informação sobre a qualidade da resposta do que os resíduos ordinários. Os resíduos padronizados ( $d$ ) podem ser obtidos dividindo-se os resíduos das observações em relação à média das réplicas pelo desvio padrão das réplicas. Deste modo, tais resíduos possuirão média igual a zero e desvio padrão unitário. Conseqüentemente, eles serão úteis na identificação de *outliers*. A maior parte dos resíduos padronizados deve encontrar-se no intervalo  $-3 \leq d \leq 3$ , e qualquer observação com resíduo padronizado fora deste intervalo pode representar uma resposta observada potencialmente não usual ou incorreta.

#### 4.6 PESQUISAS EM PROJETO DE EXPERIMENTOS SIMULADOS

Sanchez, Moeenib e Sanchez (2006) apresentam uma metodologia chamada de experimentação de domínio de freqüência, que pode ser utilizada para a melhoria do comportamento de sistemas produtivos. Com o projeto fatorial completo utilizado com a simulação, o número de corridas cresce exponencialmente com o número de fatores envolvidos, enquanto a duração das corridas permanece constante. Com experimentos de domínio de freqüência, o número de corridas é independente do número de fatores, enquanto a duração necessária das corridas cresce lentamente.

Krajewski *et al.* (1987) examinaram 36 fatores em uma investigação sobre impactos adversos de incertezas no desempenho de sistemas kanban, mas para fazer um estudo factível utilizando análise fatorial eles combinaram os fatores em sete

grupos (reduzindo assim o número de combinações). Eles investigaram os efeitos principais e sugeriram a necessidade de mais experimentos para se identificar efeitos de interação entre os grupos.

Alguns autores sugeriram trabalhos futuros em suas pesquisas, sobretudo quando alguns fatores ficaram de fora da análise do projeto experimental. Klassen e Rohleder (1996), estudando o impacto de regras de seqüenciamento e mais dois fatores ambientais em clínicas médicas, sugeriram a análise dos efeitos principais e interações entre os fatores tempo de espera, número de servidores, tipo de clínica, entre outros.

Malhotra e Ritzman (1994) consideram um projeto fatorial  $2^4$  para avaliar o impacto da variabilidade da demanda, capacidade de utilização, formas de *mix* de produção e flexibilidades de rota em uma estação de serviços postais.

Carino (2006) analisou um problema de layout através de experimentos simulados projetados através de arranjos ortogonais. Montevechi *et al.* (2007) utilizaram o projeto de experimentos associado à simulação a eventos discretos para avaliar o efeito de fatores sobre o número de peças produzidas em uma empresa de auto-peças. Nesta pesquisa, os autores consideraram significativos os efeitos das interações.

Parâmetros de processos de manufatura também foram analisados através do DOE combinado com a simulação, no trabalho de Ekren e Ornek (2008). Neste trabalho, os autores avaliam o efeito dos parâmetros layout (funcional ou celular), regra de seqüenciamento (LVF ou SPT), parada de máquina (sistema atual ou melhorado), tamanho do lote (50, 100, 150) e capacidade de transporte (atual ou o dobro). Os autores realizaram 48 experimentos simulados através do *software* Arena, avaliando os efeitos principais e as interações entre os fatores. Cada experimento foi replicado 10 vezes, com um nível de confiança de 95%.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou uma visão geral do projeto de experimentos simulados. Não foi objetivo deste capítulo apresentar todos os possíveis projetos experimentais. O

foco foi mantido na simulação e sua integração com a idéia do projeto experimental. Destacou-se neste capítulo:

- o uso do projeto de experimentos em problemas de simulação, constituindo o chamado projeto de experimentos simulados. O capítulo apresentou as vantagens desta integração, segundo a visão de vários autores;
- a explicação de alguns termos utilizados. Em especial, o capítulo apresenta uma discussão sobre os termos “replicação” e “repetição”, além da definição do que seriam os fatores de entrada e saída de uma simulação;
- pesquisas encontradas na literatura sobre o uso do DOE em problemas de simulação.

## CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DE FALHAS

Este capítulo irá apresentar uma discussão sobre falhas e sua análise. Inicialmente, o capítulo apresentará alguns conceitos envolvidos na análise de falhas. A seguir, apresentam-se alguns modelos para análises de falhas, como FMEA, FMECA e FTA. O conceito de falha dependente também é tratado neste capítulo, especificando o conceito de falhas em cascata, falhas de dependência negativa, falhas de causa comum e falhas interativas. O capítulo finaliza com o levantamento de algumas pesquisas publicadas sobre a aplicação da simulação a eventos discretos em problemas de manutenção e análise de falhas. Por fim, os destaques serão apresentados no item considerações finais.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com Duffuaa *et al.* (2001), sistemas de manutenção são responsáveis por manter os equipamentos devidamente ajustados, com garantias de segurança em sua operação e corretamente configurados para o desempenho de suas tarefas. Desta forma, a manutenção tem um impacto importante nos prazos de entrega, qualidade e custo do produto, representando um papel chave na rentabilidade a longo prazo de uma organização.

Ainda segundo os autores, o papel da manutenção já foi definido e consolidado, porém a modelagem de sistemas de manutenção não tem sido desenvolvida na mesma intensidade quanto os modelos de produção, cujas razões incluem:

- um sistema de manutenção interage com outros sistemas na organização, compondo uma rede complexa;
- os dados de saída dos sistemas de manutenção são de difícil mensuração;
- sistemas de manutenção possuem muitos elementos de incertezas, que são inerentes ao sistema. Estes elementos incluem a natureza do trabalho e o tempo necessário à execução das atividades de manutenção.

Neste caso, Duffuaa *et al.* (2001) ressaltam que um modelo conceitual e a especificação dos vários elementos e módulos do modelo auxiliam os especialistas no entendimento da complexidade do sistema de manutenção. Nesta linha de pensamento de Duffuaa *et al.* (2001); Pinho, Leal e Almeida (2006) propõem uma integração entre mapeamento de processos e mapeamento de falhas, utilizando como caso prático o setor de distribuição de energia elétrica.

Para Fagundes (2005), as organizações almejam continuamente a redução e eliminação das falhas que são inerentes aos seus produtos ou serviços. Em alguns casos esta busca se deve ao fato das falhas causarem danos à sobrevivência das pessoas, como no caso do fornecimento de energia elétrica para uma residência de pessoa que utilize um aparelho de sobrevivência. Em outros casos a redução de falhas está ligada com a vantagem competitiva, ou seja, quanto mais isentos de falhas forem os produtos e serviços que determinada empresa é capaz de fornecer ao cliente final, maior admiração terá destes mesmos clientes.

## 5.2 ALGUNS CONCEITOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE FALHAS

De acordo com o Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade (BRANCO FILHO, 1996), a falha é o término da capacidade de um equipamento desempenhar a função requerida.

Na visão de Moubray (2000), falha é definida como a incapacidade de qualquer ativo de fazer o que seu usuário quer que ele faça. Porém, é mais exato definir falhas em termos de perda da função específica do que a falha de um ativo como um todo.

Ocorrências de falhas dependem da existência das causas das falhas. As causas das falhas são as razões pelas quais as falhas ocorrem, e estas causas constituem-se de pedaços de informação úteis para se evitar a ocorrência ou mesmo a recorrência das falhas (RAUSAND e ØIEN, 1996). Para se coletar as informações relativas às causas de falhas, a estrutura do banco de dados de manutenção necessita ser construído corretamente.

Uma importante métrica utilizada na análise de falhas é o tempo médio entre falhas (MTBF - *Mean time between failures*). Esta métrica representa o tempo médio

de trabalho de um dado equipamento (reparável), com desempenho acima do mínimo aceitável. O MTBF pode ser determinado mediante a medição de uma série de  $n$  valores do tempo entre falhas (TBF). Pode-se dizer que a taxa de falhas é o inverso do tempo médio entre falhas.

Uma vez que a falha ocorra e cause um efeito indesejado no componente, este deve ser reparado (caso seja possível). Tem-se então a determinação do tempo médio de reparo (MTTR – *Mean Time to Repair*). Alguns tempos elementares são somados, como:

- tempo de verificação da falha;
- tempo de diagnóstico da causa e tipo de falha;
- tempo de acesso ao equipamento;
- tempo de desmontagem e transporte ao local de reparo;
- tempo de espera no local de reparo;
- tempo de substituição de peças ou de manutenção corretiva;
- tempo de testes no local de reparo;
- tempo de transporte e montagem na área;
- tempo de ensaios e testes locais.

A soma do tempo médio entre falhas e do tempo médio de reparo gera o tempo médio até a falha (MTTF – *Mean Time to Failure*).

Segundo Scapin (1999), a confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema ou um produto executar sua função de maneira satisfatória, dentro de um intervalo de tempo e operando conforme certas condições. A função básica da confiabilidade pode ser descrita como  $R = 1 - F$ , em que  $R$  representa a confiabilidade do sistema e  $F$  a probabilidade de que o sistema falhe num instante qualquer.

No contexto da confiabilidade, o termo “componente” é a unidade básica de um sistema. O que é considerado como uma unidade básica depende do nível de análise de confiabilidade de um sistema.

Para avaliar a confiabilidade, é necessário o emprego de funções. Segundo o autor Ebeling (1997), as quatro principais funções fundamentais, por estarem

relacionadas com termos como probabilidade e o tempo são: função da Confiabilidade  $R(t)$ , a função Probabilidade de falha  $F(t)$ , a função densidade probabilidade de falha  $f(t)$  e a função Taxa de falha  $\lambda(t)$ .

Dado um conjunto de condições operacionais, a confiabilidade de um componente ou sistema é a probabilidade de que o sistema não venha a falhar durante um período especificado de tempo. Isto pode ser expresso em termos de uma variável aleatória  $T$  (o tempo decorrido até o sistema falhar). A função densidade de probabilidade  $f(t)$  ou *pdf (probability density function)* tem o seguinte significado: probabilidade que a falha venha a ocorrer no tempo entre  $t$  e  $t + \Delta t$ . A densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  é um poderoso instrumento de visualização de como ocorrem as falhas e como elas estão estatisticamente distribuídas (EBELING, 1997).

### 5.3 MODELOS PARA ANÁLISE DE FALHAS

Segundo Braglia (2000), frequentemente o pessoal de manutenção distingue dois diferentes aspectos nos termos severidade ou gravidade: as considerações de segurança e os custos devido à ocorrência da falha. Consequentemente, diferentes modelos de análise de falhas baseados em mais índices têm sido criados. Garrick (1988) considerou índices baseados na qualidade do produto, segurança ambiental, perda de produção, efeito dominó, entre outros.

A literatura apresenta vários modelos e métodos para a análise de falhas. Podem-se citar modelos baseados em princípios probabilísticos (NARMADA e JACOB, 1996); modelos baseados na teoria Markoviana (PAPAZOGLU, 2000); modelos condicionais (COX e OAKES, 1984); modelos baseados na teoria Bayesiana (PERCY, 2002); modelos baseados em simulação de Monte Carlo (MARSEGUERRA, ZIO e PODOFILLINI, 2002); análise de árvore de falhas (FTA-*Fault Tree Analysis*) (SHALEV e TIRAN, 2007); análise dos efeitos e modos de falhas (FMEA – *Failure Modes and Effects Analysis*) (GILCHRIST, 1993) e modelos híbridos (ROSQVIST, 2000; LANDERS, JIANG e PECK, 2001).

Já Montague (1990) procurou quantificar de uma forma mais precisa a gravidade econômica de uma falha incluindo considerações sobre os custos de produtos defeituosos e da manutenção corretiva.

Alguns destes modelos serão apresentados neste item.

### 5.3.1 FMEA (*failure mode and effects analysis*)

Conforme define Tan (2003), a FMEA é uma técnica analítica utilizada por engenheiros para assegurar que todos os problemas potenciais foram considerados. A FMEA identifica modos de falha potenciais em produtos, os efeitos potenciais das falhas nos clientes, as potenciais causas destas falhas, métodos para reduzir a frequência da ocorrência dos modos de falha e a detecção das condições destas falhas.

Segundo Puente *et al.* (2002), a FMEA inicialmente foi utilizada pela Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*) em 1963 e então expandida para a indústria automobilística, onde foi utilizada para quantificar e ordenar possíveis defeitos potenciais no estágio de projeto de produtos, antes de chegarem ao consumidor final, através de sessões de discussão.

Stamatis (2003) confirma que a FMEA é um método sistemático de identificação, priorização e ação sobre os modos potenciais de falhas antes mesmo da ocorrência destas falhas. Consequentemente pode-se dizer que a FMEA é pró-ativa, ao invés de uma análise após o fato ocorrer. Esta é a essência do conceito de *build-in reliability* (BIR), que contempla métodos de garantia da confiabilidade. O autor apresenta detalhes do procedimento de como conduzir uma FMEA e suas várias aplicações.

Segundo Pillay e Wang (2003), o modo de falha pode ser entendido como uma categoria de falha. Um modo potencial de falha descreve a forma na qual um produto ou processo poderia não apresentar o desempenho desejado para sua função, como por exemplo fadiga, colapso, quebra, deterioração, perda, vibração, queima, etc.

Ainda de acordo com Pillay e Wang (2003), a potencial causa da falha refere-se à causa para cada modo de falha, como por exemplo: material incorreto, corrosão, erro

de montagem, excesso de calor ou frio, má manutenção, impureza no material, desalinhamento, etc.

Outro aspecto importante na análise de falhas é o efeito. Para Moubray (2000), os efeitos de falhas descrevem o que acontece quando ocorre um modo de falha. O autor ainda diferencia o termo “efeito” do termo “consequência”. Para Moubray (2000), o efeito de falha responde a questão “o que acontece?”, enquanto a consequência da falha responde a questão “como ela importa?”.

Engenheiros de projeto geralmente analisam a causa raiz e os efeitos finais de falhas potenciais, em um subsistema ou componente. A análise é organizada em torno dos modos de falha, os quais são relacionados com suas causas e seus efeitos (RHEE e ISHII, 2003).

Basicamente, a FMEA pode ser classificada em dois tipos (TEOH e CASE, 2004):

- FMEA de projeto: trabalha com atividades de projeto, como projeto de produtos, máquinas ou ferramentas.
- FMEA de processo: utilizada para resolver problemas ligados a processos produtivos.

A FMEA apresenta um *ranking* para priorizar as falhas. Este *ranking* tem o objetivo de direcionar os recursos limitados aos itens de maior risco. O RPN (*Risk Priority Number*) é calculado através da multiplicação de três fatores: probabilidade de ocorrência ( $S_f$ ), severidade da falha ( $S$ ) e probabilidade da não detecção da falha ( $S_d$ ). Estes fatores são escalonados em 10 pontos (de 1 a 10).

As tabelas a seguir (Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3) apresentam um sistema de pontuação utilizado na determinação dos fatores ocorrência, severidade e detecção.

Tabela 5.1 - Critério de análise e sistema de ordenação para a ocorrência da falha.  
Fonte: Lange (2001)

Probabilidade de ocorrência	Possíveis taxas de falhas	Pontuação
Extremamente alta: quase inevitáveis	$\geq 1$ em 2	10
Muito alta	1 em 3	9
Repetidas falhas	1 em 8	8
Alta	1 em 20	7
Moderadamente alta	1 em 80	6
Moderada	1 em 400	5
Relativamente baixa	1 em 2000	4
Baixa	1 em 15000	3
Remota	1 em 150000	2
Quase impossível	1 em 1500000	1

Tabela 5.2 - Critério de análise e sistema de ordenação para a detecção da causa da falha.  
Fonte: Lange (2001)

Deteção	Probabilidade de deteção da causa da falha	Pontuação
Absolutamente incerta	A manutenção não detecta a causa da falha potencial, ou não existe manutenção	10
Muito remota	Chance muito remota de se detectar a causa da falha	9
Remota	Chance remota de se detectar a causa da falha	8
Muito baixa	Chance muito baixa de se detectar a causa da falha	7
Baixa	Chance baixa de se detectar a causa da falha	6
Moderada	Moderada chance de se detectar a causa da falha	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta a chance de se detectar a causa da falha	4
Alta	Chance alta de se detectar a causa da falha	3
Muito alta	Chance muito alta de se detectar a causa da falha	2
Quase certa	A manutenção quase certamente detectará a causa da falha.	1

Tabela 5.3 - Critério de análise e sistema de ordenação para a severidade dos efeitos da falha.  
Fonte: Lange (2001)

Efeito	Severidade do efeito	Pontuação
Perigoso	Falha é perigosa, e ocorre sem aviso. Capaz de suspender a operação dos sistemas e/ou envolve aspectos não complacentes com regulações governamentais	10
Sério	Os efeitos podem ser perigosos e/ou envolvem aspectos não complacentes com regulações governamentais	9
Importante	Produto inoperável, com perda da função básica. Sistema inoperante	8
Impactante	Desempenho do produto sofre impacto. Sistema pode não operar.	7
Significativo	Desempenho do produto é degradado. Funções atreladas ao conforto podem não operar.	6
Moderado	Moderado efeito no desempenho do produto. Produto requer reparos.	5
Baixo	Pequeno efeito no desempenho do produto. O produto não requer reparos.	4
Desprezível	Efeito desprezível no desempenho do produto ou sistema.	3
Muito desprezível	Efeito muito desprezível no desempenho do produto ou sistema.	2
Nenhum	Nenhum efeito	1

O fator ocorrência está relacionado à probabilidade de ocorrência dos modos de falha e causas. Taxas de ocorrência têm sido padronizadas por muitas empresas do

setor eletrônico e automotivo, nos últimos anos. Segundo Rhee e Ishii (2003), o valor 10 na tabela de ocorrências corresponde a uma falha que ocorre a cada parte. O valor 1 corresponde a uma falha em 1 milhão de partes.

A severidade indica a gravidade dos efeitos dos modos de falha. Desta forma, a severidade é considerada no efeito final da falha. Para Pillay e Wang (2003), a severidade é a dimensão de quão sério o efeito do modo potencial de falha é para o cliente/usuário.

Neste caso, o valor 1 corresponde a uma falha que em nada afeta o sistema. Já o valor 5 indica uma perda de desempenho, provocada pela falha. O valor 7 indica uma parada de máquina, enquanto o valor 10 corresponde a falha com ameaça à vida (RHEE e ISHII, 2003). Vale destacar que estes valores são arbitrários e seus valores comparativos são mais importantes do que os valores absolutos.

Já no caso da detecção, o valor 1 remete ao modo de falha que é quase sempre detectado e o valor 10 corresponde ao modo de falha que é geralmente impossível de se detectar.

Os modos de falhas com alto valor de RPN são selecionados. Os correspondentes controles (e soluções) são implementados para estes altos RPNs.

Alguns autores defendem que a FMEA pode ser melhor aproveitada segundo os princípios da gestão do conhecimento. Neste contexto, Teoh e Case (2004) afirmam que variadas informações sobre falhas em projetos e processos, geradas pela FMEA, possibilitam a geração de um conhecimento valioso para futuros projetos de produtos e processos. O trabalho destes autores objetivou contribuir para o re-uso do conhecimento da FMEA através de uma abordagem de modelagem do conhecimento (*knowledge modeling*), através da ferramenta diagrama funcional. O método é validado através de um caso prático, onde é analisado o protótipo de um *software*.

Almeida, Leal e Almeida (2005) sugerem uma extrapolação do RPN para o futuro, utilizando novos parâmetros no cálculo, como o índice de sazonalidade. Tem-se, então, o chamado PRPN (*Potential Risk Priority Number*).

Outras melhorias foram propostas à FMEA, como mostra o item a seguir.

### 5.3.1.1 Críticas e melhorias à FMEA

Rhee e Ishii (2003) alertam que, embora muitas empresas utilizem a técnica FMEA, existem muitas limitações e problemas. O risco é medido em termos do RPN. A medida da severidade e da detecção apresenta uma série de dificuldades, devido à grande subjetividade destes parâmetros, além de utilizarem uma escala não universal. O RPN é também um produto de números que representam uma relação ordinal, o que não é indicado como uma medida formal.

Pillay e Wang (2003) afirmam que uma das principais críticas consiste no fato de que a relação entre o valor de *ranking* do fator ocorrência e a escala de probabilidade de ocorrência não é linear, enquanto é linear a relação entre o valor de *ranking* do fator detectabilidade e a probabilidade utilizada na escala.

Os três índices utilizados no cálculo do RPN utilizam uma escala ordinal, que são utilizadas para criar um *ranking*. Valores ordinais preservam a informação do *ranking*, mas as distâncias entre estes valores não podem ser mensurados, uma vez que esta distância não existe. Esta constatação vai contra o uso formal da medida expressa pelo RPN. Várias técnicas têm sido utilizadas para melhorar a abordagem tradicional do FMEA, como o uso do RPN em escala logarítmica, uso da simulação de Monte Carlo, rede Petri, entre outras.

Outra crítica feita à FMEA ocorre devido aos vários conjuntos de  $S_f$ ,  $S$  e  $S_d$  poderem gerar idênticos valores de RPN, porém com implicações de risco totalmente diferentes (Ben-Daya e Raouf, 1993; Gilchrist, 1993). A Figura 5.1 mostra os mil valores possíveis de RPN, gerados a partir de todas as possíveis combinações dos fatores ocorrência (1 a 10), detecção (1 a 10) e severidade (1 a 10). É possível observar que quase todo valor de RPN não é único, sendo alguns gerados 24 vezes.

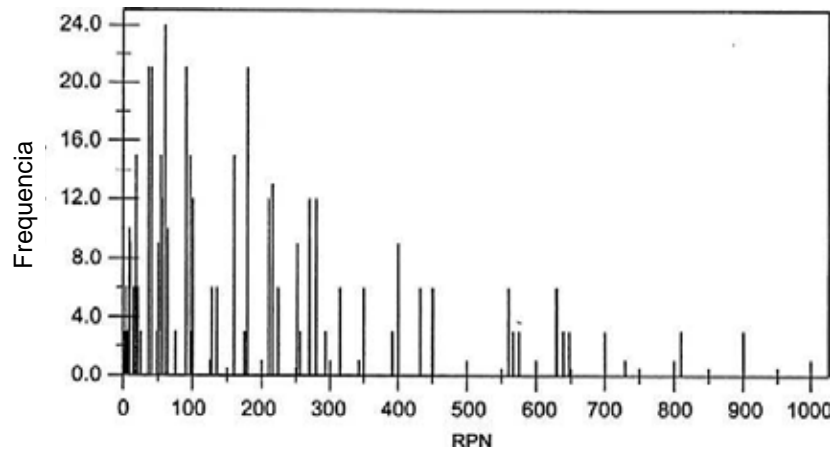


Figura 5.1 – Histograma dos possíveis valores do RPN gerados a partir de todas as possíveis combinações de  $S_f$ ,  $S$  e  $S_d$ .

Fonte: Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006)

Pillay e Wang (2003), ao criticar a FMEA tradicional, propõem uma nova abordagem, a qual utiliza regras *fuzzy* e a teoria *grey*.

Pesquisadores como Russomano, Bonnell e Bowles (1992); e Price *et al.* (1995) discutiram o uso de um sistema com base no conhecimento (*knowledge base system*) para a automação da FMEA de processo. Kara-Zaitri, Keller e Fleming (1992) apresentam uma melhoria na FMEA, ao utilizar uma matriz para modelar todo o sistema e mais um conjunto de índices derivados de combinações probabilísticas. Outra abordagem foi apresentada por Pelaez e Bowles (1996), mas desta vez utilizando um mapa cognitivo baseado na lógica *fuzzy*.

O artigo de Rhee e Ishii (2003) introduz uma versão da FMEA onde o risco é mensurado em termos do custo, chamada de *Cost-Based FMEA*. Ainda destacando o trabalho destes autores, estes aplicam a simulação de Monte Carlo no *Cost-Based FMEA* para contabilizar as incertezas no tempo de detecção, tempo de reparo, número de ocorrências, tempo de espera, tempo de paralisação, entre outros.

Braglia (2000) aponta a dificuldade na escolha da pontuação nas escalas da FMEA. Segundo o autor, para os especialistas de manutenção de uma empresa é muito difícil atribuir valores aos fatores da FMEA, que são praticamente intangíveis.

Segundo Lee (2000), as planilhas tradicionais da FMEA limitam a representação da falha.

O trabalho de Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006) propõe a aplicação de um método para tomada de decisão para repriorização de modos de falhas na FMEA. Os autores criticam dois pontos na forma de priorização da FMEA: a não consideração das relações indiretas entre os componentes e a deficiência apresentada no caso de muitos subsistemas ou componentes. O método proposto pelos autores foi chamado de *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL). Os autores também criticam o fato do RPN não ponderar os fatores.

Hussain *et al.* (2007) analisaram falhas através de escalas semelhante às utilizadas na FMEA, em sistemas de arquitetura de negócios digitais. Ainda focando as dificuldades da FMEA e propondo melhorias, Aguiar e Salomon (2007) verificaram as dificuldades no emprego da FMEA e realizaram uma hierarquização das irregularidades encontradas de acordo com a gravidade, utilizando-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e Conjuntos *Fuzzy*.

### **5.3.2 FMECA (*failure mode, effects and criticality analysis*)**

A técnica da FMECA (*Failure mode, effects and criticality analysis*), segundo Braglia (2000), tem como objetivo determinar a confiabilidade do projeto considerando as causas potenciais de falhas e seus efeitos sobre o sistema em estudo.

Segundo Wei (1991), a FMECA é uma função essencial no projeto. A proposta da FMECA é gerar um sistemático exame crítico dos modos de falha potencial de plantas e equipamentos e suas causas, para avaliar a segurança dos vários sistemas ou componentes, para analisar o efeito de cada modo de falha na operação do sistema e para identificar ações corretivas, como por exemplo, modificações no projeto.

A FMECA utiliza um número de criticidade (Cr), para um determinado modo de falha, baseado em fatores de ajuste (operacional e ambiental), tempo planejado de operação, relação de modo de falha representando uma porção da taxa de falha do item, probabilidade que a falha ocorra e taxa de falha.

Para a avaliação da criticidade, a FMECA necessita de um estudo estatístico de confiabilidade no produto estudado. São utilizados modelos de distribuição estatística para "desenhar" a confiabilidade do produto.

Para Braglia (2000), as principais vantagens da FMECA são:

- é uma ferramenta visual que pode facilmente ser compreendida e utilizada;
- possui um procedimento sistemático que pode ser representado em um programa computacional e armazenado em bancos de dados;
- é capaz de identificar as fraquezas de um projeto de sistema, focando a atenção em poucos componentes.

Uma crítica feita à FMECA está no fato de que poucos atributos da falha são contemplados na ferramenta. Questões como o custo da falha são omitidas. Para isso, Braglia (2000) propõe uma integração da FMECA com considerações econômicas. Neste caso, a FMECA é abordada como uma técnica de tomada de decisões multicritério, integrando quatro fatores: chance de falha, chance de não-detecção, severidade e custo esperado. O AHP foi utilizado neste caso. A técnica, batizada de MAFMA, foi aplicada em uma empresa de refrigeradores na Itália.

A literatura apresenta possibilidades para o uso da lógica *fuzzy* na abordagem da FMECA (CAYRAC, DUBOIS e PRADE, 1996; KIESELBACH, 1997; PAPIC e ARONOV, 1996; PELAEZ e BOWLES, 1994). Existe neste caso um consenso de que a lógica *fuzzy* representa uma forma interessante de manipular os termos lingüísticos utilizados pelo pessoal de manutenção nos julgamentos realizados na FMECA.

Aplicações práticas da FMECA podem ser encontradas na literatura. O trabalho de Bertolini, Bevilacqua e Massini (2006) apresenta uma aplicação da FMECA no processo de produção de uma indústria alimentícia. Neste trabalho, a ordenação das falhas ocorre de acordo com a análise de criticidade (CA – *Criticality Analysis*).

### 5.3.3 FTA (*fault tree analysis*)

A FTA é uma técnica analítica de análise de confiabilidade e de segurança amplamente utilizada. Sua utilização, segundo Scapin (1999), visa à identificação de pontos para a introdução de melhorias ou de modificações para tornar o produto mais

robusto, através de abordagem sistêmica, traçando a rota entre os sintomas percebidos pelos clientes e as causas das anomalias dentro da arquitetura do produto.

Segundo Shalev e Tiran (2007), a FTA é uma ferramenta para aumentar a confiabilidade de um sistema durante o estágio de projeto. Para os autores, a FTA é uma ferramenta de análise aplicável e útil, sendo utilizada para identificar e classificar situações de risco e calcular a confiabilidade de sistemas tanto para casos de sistemas com engenharia simples e complexa. O analista define o evento de topo, que corresponde a uma falha ou acidente, e então constrói a seqüência de eventos que leva a este evento de topo.

Kara-Zaitri (1996) apresenta um breve histórico do desenvolvimento da FTA. Segundo o autor, esta técnica foi criada e desenvolvida por H.A. Watson no início dos anos 60 em laboratórios como parte de um contrato de pesquisa colaborativa com a Força Aérea dos Estados Unidos.

A lógica aplicada na construção dos modelos é de cima para baixo (*top-down*). O analista repetidamente pergunta: “o que causará a ocorrência de uma possível falha?”.

Uma FTA, além de estabelecer ligações entre os pontos críticos de um sistema, se utiliza de lógica binária, razão pela qual se aplica a álgebra *booleana* nos cálculos das probabilidades de acontecimentos dos eventos indesejáveis que um produto apresenta em função de suas deficiências de projeto, processo e de assistência técnica.

Segundo Shalev e Tiran (2007), na base de cada possível caminho representado na árvore (pés da árvore) existe um evento básico de falha. O analista então atribui a cada um destes eventos básicos uma taxa de falha. Frequentemente, a taxa de falhas atribuída é um dado estatístico proveniente de variadas fontes.

A lógica *booleana* utilizada pode ser observada nas portas lógicas, como mostra a Figura 5.2.

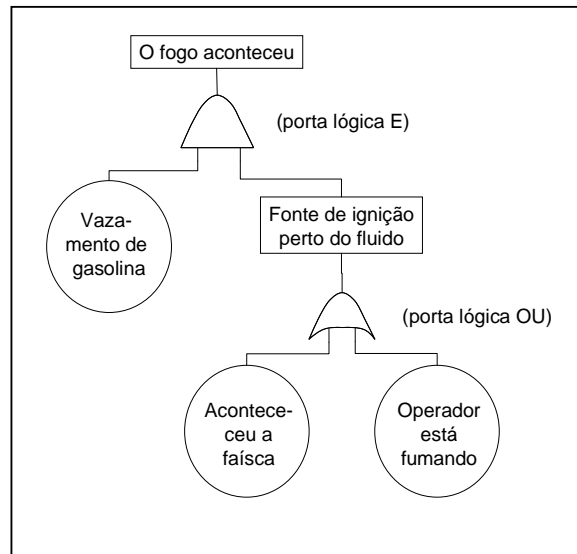


Figura 5.2 – Exemplo de aplicação da FTA.  
Fonte: Scapin (1999)

O evento de saída conectado pela porta lógica *E* ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrerem simultaneamente. Em sentido oposto, o evento de saída conectado pela porta lógica *OU* somente ocorre se qualquer um dos eventos de entrada ocorrer.

A literatura apresenta algumas críticas à FTA. Imperfeições na predição da confiabilidade foram ilustradas no trabalho de Blanks (1992), através da comparação de MTBFs preditos (previsão) e demonstrados (dados reais). Na maioria dos casos, os MTBFs demonstrados foram menores que os previstos. Este fato vai de acordo com a observação de Shalev e Tiran (2007), afirmando que muitos analistas são relutantes ao uso quantitativo da FTA.

Algumas pesquisas propõem melhorias na FTA. Shalev e Tiran (2007) propõem uma melhoria através do uso da CBFTA (*Condition-based fault tree analysis*), onde esta ferramenta atualiza os valores de confiabilidade de um sistema específico e calcula a vida residual de acordo com as condições do sistema monitorado. Ainda segundo os autores, utilizando o CBFTA, a FTA original é evoluída para uma ferramenta prática, para uso durante a fase de vida prática do sistema, e não apenas durante a fase de projeto do sistema.

Uma técnica encontrada na literatura, sobretudo na área de qualidade, chamada de diagrama sistemático de causa e efeito (DSCE), também tem o objetivo de mapear a

relação causa e efeito. Porém, ao contrário da FTA, o DSCE não apresenta as portas lógicas. Fagundes (2005) apresenta em seu trabalho uma análise de falhas típicas do setor de distribuição de energia elétrica, utilizando o DSCE.

Pode-se citar também o uso da gestão do conhecimento associado à construção das árvores de falhas. Almeida *et al.* (2006) propõe o uso de informações (documentos, descrições, fotos) associadas aos nós e conexões da árvore, a fim de possibilitar às organizações reconhecerem a arquitetura das falhas. A gestão deste conhecimento se aplica a treinamentos e a tomada de decisões, focando evitar a reincidência destas falhas.

#### 5.4 FALHAS DEPENDENTES

Na engenharia de confiabilidade tradicional, é usual assumir que as falhas de componentes são eventos independentes. Esta suposição assegura situações onde as falhas em componentes não induzem efeitos em outros componentes.

Sun *et al.* (2006) também afirmam que a maioria dos modelos apresentados na literatura para análise de falhas apresenta a suposição de que as falhas são independentes. Entretanto, experiências industriais têm mostrado que esta suposição de falhas independentes têm sido irreais.

O conceito de falhas dependentes foi introduzido por Mosleh (1991) e também discutido por Rausand e Høyland (2003).

Na opinião de Sun *et al.* (2006), as mais discutidas falhas dependentes são: falhas em cascata, falhas com dependência negativa e falhas de causa comum.

As falhas em cascata são definidas como falhas seqüenciais múltiplas. Estas falhas são inicializadas por uma falha em um componente, a qual conduz a uma seqüência de falhas em outros componentes. Falhas com dependência negativa são definidas como falhas que podem impedir outros componentes do sistema, mais a frente, de falharem. Sun *et al.* (2006) alertam que estes dois tipos de falhas dependentes são frequentemente analisados utilizando-se abordagens para falhas independentes, como FTA, RBD (*Reliability Block Diagram*) e modelos de *Markov*.

Falhas de causa comum são definidas como eventos gerados por causas em comum. Segundo Sun *et al.*(2006), a maioria das pesquisas foca falhas dependentes em falhas de causa comum, sendo em grande parte aplicadas em problemas de falhas em aviões e em instalações nucleares. Autores como Vaurio (2007) apresentam um estudo sobre o cálculo da taxa de falhas de causa comum.

O conceito de falhas dependentes (*Dependent Failures – DF*) e falhas de causa comum (*Common Cause Failures – CCF*) deve ser analisada de forma especial em sistemas aeroespaciais e sistemas de energia nuclear, devido à possibilidade de efeitos catastróficos (Rutledge e Mosleh, 1995).

Os autores Sun *et al.* (2006) afirmam que, em alguns sistemas, falhas em certos componentes podem interagir entre si e acelerar a taxa de falhas destes componentes.

Estas falhas são definidas como falhas interativas, e ocorrem principalmente em sistemas mecânicos. Se este efeito interativo for ignorado, o risco da falha será subestimado. Entretanto, como afirmam os autores (SUN *et al.*, 2006, p.495), “(...) a literatura é silenciosa em pesquisas que exploram este campo”.

Existem duas categorias de falhas interativas:

- falhas com interação imediata: a influência no efeito ocorre imediatamente. As condições dos dois componentes antes da falha são independentes; **(esta é a categoria de falha a ser analisada neste trabalho)**;
- falhas com interação de degradação gradual: condição de dependência dos componentes antes da falha. Um componente deteriora com o tempo, ou seja, a taxa de falhas de um componente aumenta com o tempo.

Sun *et al.* (2006) dão o foco de seu trabalho em falhas com interação de degradação gradual, por trabalhar com componentes mecânicos em sua aplicação prática, além de considerar somente falhas com dependência positiva. Segundo eles, falhas em componentes elétricos normalmente ocorrem de forma súbita, ao contrário de componentes mecânicos. O trabalho dos autores aborda a taxa de falha interativa, como sendo:

$$h_1(t) = \varphi_1[h_{11}(t), h_2(t)_B, t] \quad (5.1)$$

$$h_2(t) = \varphi_2[h_1(t)_B, h_{12}(t), t] \quad (5.2)$$

onde  $h_1(t)$  e  $h_2(t)$  são as taxas de falha interativa do componente 1 e componente 2, respectivamente. Já os termos  $h_1(t)_B$  e  $h_2(t)_B$  são as taxas de falha dos componentes 1 e 2 antes da ocorrência da interação. Os termos  $h_{11}(t)$  e  $h_{12}(t)$  são as taxas de falha independente, dos componentes 1 e 2, respectivamente.

Os autores chegam por fim na taxa de falha interativa do componente i, como mostra a equação (5.3):

$$h_i(t) = \varphi_i \Big|_{h_{j_i}(t)_B=0} + \left[ \sum_{j_i} \frac{\partial \varphi_i}{\partial h_{j_i}} \Big|_{h_{j_i}(t)_B=0} + \sum_{j_i, k_i} \frac{\partial^2 \varphi_i}{4 \partial h_{j_i} \partial h_{k_i}} \Big|_{h_{j_i}(t)_B=0} h_{k_i}(t)_B + \sum_{j_i} \frac{\partial^2 \varphi_i}{2 \partial h_{j_i}^2} \Big|_{h_{j_i}(t)_B=0} h_{j_i}(t)_B + A \right] * h_{j_i}(t)_B \quad (5.3)$$

onde A = termos de mais alta ordem dividido por  $h_{j_i}(t)_B$ .

O detalhamento desta equação não faz parte do escopo deste trabalho. Porém, vale destacar que a análise de falhas interativas leva a análises algébricas complexas, como mostra a taxa de falha interativa. A motivação deste trabalho está em compreender como avaliar o efeito destas interações de falhas em sistemas de manufatura.

O trabalho de Sun, Ma e Mathew (2008) enfoca a questão da interação de falhas em componentes mecânicos, através de um modelo analítico para falhas interativas (AMIF - *Analytic Model for Interactive Failure*). Neste caso, o trabalho concluiu que falhas interativas aumentam o risco da necessidade de reparos em novos componentes.

Além disso, os intervalos aplicados nas práticas de manutenção preventiva, em sistemas sujeitos a falhas interativas, tornam-se menores comparados aos intervalos de manutenção preventiva em cenários sem falhas interativas. Neste trabalho, os autores destacam que pesquisas envolvendo análises de confiabilidade em sistemas sujeitos a falhas interativas ainda estão na “infância”.

## 5.5 PESQUISAS EM SIMULAÇÃO DE PROBLEMAS DE MANUTENÇÃO E FALHAS

Spedding e Chan (2001) incluíram a presença de defeitos no processo, utilizando o *software* Promodel 4.0. Para isto, foram utilizadas distribuições para os tempos de operação das máquinas, tempos de parada e tempo entre falhas, distribuições estas apontadas pelo *Stat:Fit*, um *software* de análise de dados de entrada. Cada simulação foi observada em um período de dez dias, com cinco replicações. Foram comparados os rendimentos do processo real e o simulado e foi constatada a não significância da diferença encontrada, validando assim o modelo.

O trabalho de Dessouky e Bayer (2002) apresentou um projeto de experimentos simulados para selecionar uma melhor política de manutenção. Os *outputs* da simulação foram usados em uma matriz experimental  $2^4$  para identificar os fatores que possuíam o maior impacto nos custos, com conseqüente minimização de mão de obra necessária. Vale destacar que neste caso o foco não foi a análise de falhas, e sim os processos adotados pelo pessoal de manutenção.

No trabalho de Dessouky e Bayer (2002), os quatro fatores utilizados foram:

- severidade do problema, com os níveis “reparável” e “não reparável”;
- política de manutenção, com os níveis “aplicável” e “não aplicável”;
- capacitação do recurso, com os níveis “trabalhador qualificado” e “trabalhador não qualificado”;
- tempo de validação, com os níveis “melhorado” e “não melhorado”.

Utilizou-se no trabalho de Dessouky e Bayer (2002) o simulador Promodel 4.0, com quatro replicações, cujos experimentos foram projetados com a técnica de Taguchi.

Já Márquez (2005) apresentou um estudo de caso (18 motores diesel) onde a simulação computacional (processo semi-Markoviano de modelagem de simulação) é utilizada para avaliar estratégias de manutenção focadas em sistemas reparáveis sujeitos a falhas críticas. Cada experimento com uma política de manutenção consistiu

em 10 replicações no simulador. Para cada métrica obtida, calculou-se o intervalo de confiança com 95%.

Autores como Albino, Carella e Okogbaa (1992), Savsar, Khan e El-Tamimi (1993); e Vineyard e Meredith (1992) estudaram algumas relações entre manutenção e produção e desenvolveram modelos de simulação para investigar o efeito de diferentes políticas de manutenção na produção.

Outros trabalhos utilizando simulação em problemas de manutenção podem ser encontrados em Barnet e Blundell (1981), Savsar (1990), Gartland *et al.* (1997), utilizando a simulação para determinar o número ótimo de funcionários de manutenção e níveis de estoque. Outras medições encontradas nestes trabalhos são o nível de serviço, as taxas de utilização das máquinas e pessoas, e o material em processo (*work-in-process*).

Mosley *et al.* (1998) desenvolveram um modelo de simulação para seqüenciar as atividades. O objetivo foi reduzir o tempo de parada, priorizando a produção, através do uso de um número limitado de pessoal de manutenção.

Já Joo, Levary e Ferris (1997) utilizaram um modelo de simulação para analisar a aplicação da manutenção preventiva em fábricas e melhorar sua eficiência. As medidas utilizadas foram a utilização média de equipamentos e o tempo médio de espera. Al-Zubaidi e Christer (1997) desenvolveram um modelo de simulação para determinar o número ótimo de funcionários de manutenção de um hospital. As medidas utilizadas foram o tempo de serviço, número de trabalhos executados e pendentes por dia.

Vale destacar uma crítica de Andijani e Duffuaa (2002), que afirmam que muitos estudos de simulação em sistemas de manutenção ignoram fases como o projeto de experimentos, validação do modelo e análise de resultados. Apesar da afirmação dos autores, é possível encontrar trabalhos como de Kenne e Garbi (1999), que utilizaram o DOE na simulação para o controle da produção, levando-se em conta a manutenção preventiva do sistema de manufatura.

O trabalho de Duffuaa *et al.* (2001) propõe o desenvolvimento de um modelo conceitual genérico que integra as atividades principais de um sistema de manutenção. Este modelo conceitual consiste em sete módulos. O modelo conceitual é utilizado para o desenvolvimento de um modelo de simulação estocástico, utilizado para

examinar o desempenho de diferentes políticas de manutenção e o ótimo uso de recursos no sistema de manutenção.

No trabalho de Ramaswamy (1994), o autor modela, simula e analisa falhas potenciais em sistemas de abastecimento de materiais através de rede Petri estendida (EPNs).

Bestory, Marc e Levi (2007) utilizaram a simulação de Monte Carlo para verificação da confiabilidade de circuitos eletrônicos.

Vale destacar que sistemas de serviços também são explorados em trabalhos, no estudo e análise de falhas. Trabalhos como Hsiu-Ju, Gwinner e Su (2004) apresentam uma discussão sobre falhas em serviços, embasados na diferença entre a expectativa do cliente e a percepção do cliente.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo possui uma importância especial no trabalho, por apresentar conceitos e pesquisas diretamente relacionadas com o problema central desta tese. Destacam-se neste capítulo:

- as críticas encontradas na literatura atribuídas à FMEA, sobretudo quanto à forma de cálculo do RPN;
- relatos de autores salientando que problemas que envolvem falhas dependentes são freqüentemente resolvidos com abordagens típicas de problemas de falhas independentes;
- pesquisas recentes alertando que o assunto em questão ainda é pouco explorado na literatura;
- o conceito de falha interativa;
- a pesquisa de Sun *et al.* (2006) sobre o cálculo da taxa de falhas interativas. Pode-se notar a complexidade envolvida na álgebra aplicada;
- por fim, destacam-se os subsídios encontrados que confirmam a contribuição deste trabalho.

## CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO PRÁTICA

Este capítulo apresenta todos os resultados encontrados nesta pesquisa. Os dois objetos de estudo são apresentados e modelados conceitualmente. A modelagem conceitual é apresentada utilizando-se a técnica IDEF-SIM, desenvolvida neste trabalho e devidamente detalhada neste capítulo. Cada um dos objetos de estudo é modelado no *software* de simulação, além de verificado e validado. Após, apresentam-se os modos de falha, bem como sua modelagem (conceitual e computacional). São analisados dois cenários no primeiro objeto de estudo, e quatro cenários no segundo objeto de estudo. As matrizes experimentais geradas através dos experimentos simulados são apresentadas, bem como a análise dos efeitos dos modos de falha e suas interações. Cada cenário apresenta-se então discutido, dentro das suas limitações e contribuições.

### 6.1 APRESENTAÇÕES DOS OBJETOS DE ESTUDO

A aplicação prática deste trabalho ocorreu em uma empresa industrial do setor de auto-peças, em Itajubá, Minas Gerais. O produto final desta empresa é o anel, utilizado em motores de automóveis.

Esta empresa é dividida em mini-fábricas, especializadas em um determinado tipo de produto, sendo no caso algumas variações de anéis. A mini-fábrica escolhida para a análise é a mini-fábrica de produtos de aço. A escolha desta mini-fábrica se justifica por esta possuir um banco de dados de ocorrências de falhas, com a determinação das datas de ocorrência e alguns dados do processo naquela ocasião, como peças produzidas, tempo gasto de processamento, número de refugos. Não seria viável a esta pesquisa a escolha de um processo onde não houvesse um registro de falhas, uma vez que a modelagem através de simulação exige um detalhamento quantitativo de cada evento.

A empresa vinha iniciando alguns projetos com simulação a eventos discretos, demonstrando uma grande aceitação pela técnica, por parte da gerência. Foi constatado

ainda que a empresa possuía um bom controle sobre o histórico de falhas sobre os objetos de estudo selecionados. A idéia central da tese foi muito bem aceita pela empresa, sobretudo pela gerência da mini-fábrica selecionada.

A mini-fábrica selecionada é responsável pelos anéis de compressão de aço (localizado no 1º canaleta do pistão), como mostra a Figura 6.1. Sua principal função é vedar a câmara de combustão e por esse motivo tem influência direta no consumo de óleo e na potência do motor.

Dentro desta mini-fábrica, foram escolhidos dois locais para a aplicação prática. Estes dois locais correspondem a dois trechos do processo, marcados por diferentes características, como será visto a seguir.

Durante as primeiras visitas à empresa, foi feito um reconhecimento inicial dos processos candidatos a objeto de estudo da pesquisa. Como já foi salientado antes, havia a necessidade de se escolher processos/células com um banco de dados de ocorrência de falhas.

O primeiro objeto de estudo é uma célula da mini-fábrica, que transforma a matéria-prima (fitas de aço inox) em produtos semi-acabados. Esta célula está disposta no início do fluxo da mini-fábrica, sendo responsável pelo primeiro processamento do produto, recebendo a matéria-prima do fornecedor, em fitas de aço inox, e transformando em produtos semi-acabados.

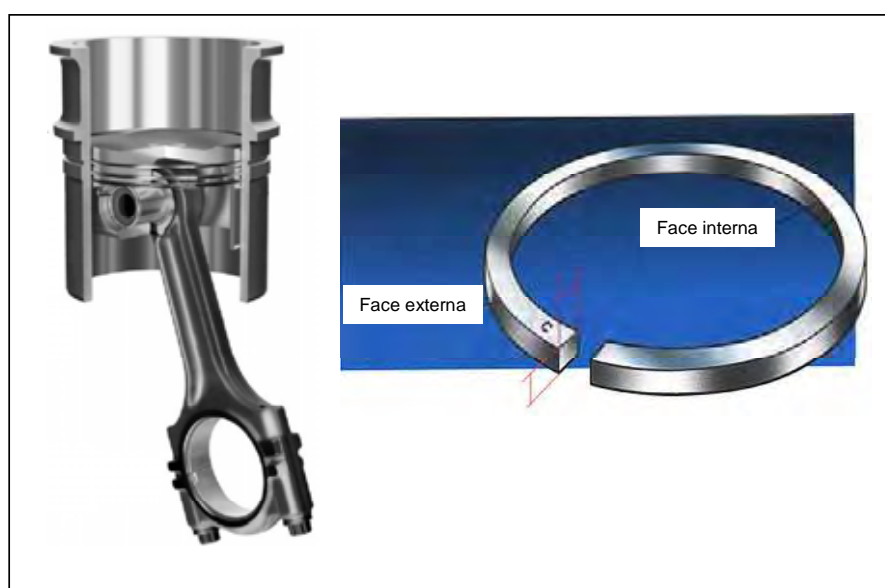


Figura 6.1 – O anel de compressão: produto do processo considerado

Este primeiro objeto de estudo conta com oito máquinas e seis colaboradores (funcionários) alocados em três turnos de produção, sendo dois funcionários para cada turno. Cada um destes funcionários opera duas máquinas, alimentando outras duas, além de transportar as unidades para dentro e fora da célula. Estes funcionários ainda realizam a inspeção dos produtos e realizam os *setups* parciais e totais de cada máquina.

Esta célula possui ainda características intrínsecas a seu processo que possibilitam uma pequena variedade de modos de falha. Esta característica a difere, quanto à análise de falhas, do segundo objeto de estudo deste trabalho.

O segundo objeto de estudo corresponde a duas células responsáveis pelo acabamento do produto. A variedade de modos de falhas é maior, comparado ao primeiro objeto de estudo. Maiores detalhes destes objetos de estudo serão dados na modelagem conceitual.

Durante este capítulo, serão analisados diferentes cenários para cada objeto de estudo, contemplando diferentes limitações e contribuições de cada cenário. Para cada cenário analisado, a variável de resposta estudada mudará de posição no modelo. Isto porque o produto gerado nos objetos de estudo muda de nome e estrutura ao longo do processo. Pode-se citar como exemplo o fato do anel, em determinado ponto do processo, ser agrupado em conjuntos nomeados de prismas.

Os modos de falha simulados terão dois aspectos considerados: a ocorrência e os efeitos locais. A combinação dos dados de ocorrência e efeitos locais gerará no modelo os efeitos globais. Cada modo de falha terá a quantidade de ocorrências controladas, porém cada ocorrência se dá em momentos aleatórios, portanto sem o controle do pesquisador. Este aspecto é importante pois retira do pesquisador a decisão de quando o modo de falha vai ocorrer, mas sim exige do pesquisador a decisão de quantas vezes o modo de falha vai ocorrer.

Em todos os cenários avaliados, a variável de resposta se refere ao número de peças produzidas. Este número de peças produzidas poderá ser de um único posto de trabalho ou mesmo de toda a célula. Desta forma, os modos de falha apresentarão um efeito de diminuir o valor da variável de resposta, afetando assim negativamente a produção.

Assim como apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho, todo projeto de simulação necessita de um modelo conceitual. Um bom modelo conceitual permite ao modelador desenvolver o modelo computacional de forma mais ágil e precisa. No caso específico deste trabalho, além do modelo conceitual do processo a ser simulado, há a necessidade da integração da modelagem conceitual das falhas. Desta forma, cumprindo um dos objetivos específicos deste trabalho, o item a seguir apresenta a técnica de modelagem conceitual elaborada nesta tese.

## 6.2 TÉCNICA DE MODELAGEM DESENVOLVIDA: O IDEF-SIM

A literatura demonstrada nesta tese apresenta algumas técnicas de modelagem de processo já desenvolvidas focando projetos de simulação, como o SAD e o IDEF2, sendo este último pouco utilizado na literatura. Mas então por que desenvolver mais uma alternativa para a modelagem conceitual? A idéia é construir uma lógica de modelagem conceitual focando projetos de simulação, utilizando-se técnicas de modelagem já consagradas dentro do contexto do BPM (*Business Process Modeling*). Desta forma pretende-se diminuir a distância entre a modelagem clássica de processos e a modelagem conceitual com foco na simulação.





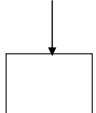




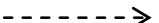
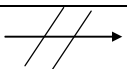


Esta técnica deverá facilitar o trabalho encontrado na fase de modelagem computacional, reduzindo o tempo gasto. Além disto, a técnica poderá ser utilizada em projetos de racionalização, uma vez que utiliza elementos lógicos de técnicas de modelagem comumente utilizadas no contexto do BPM. Esta técnica será denominada aqui de IDEF-SIM. Esta técnica foi publicada no trabalho apresentado por Leal, Almeida e Montevechi (2008).

Utilizando e adaptando elementos lógicos já utilizados nas técnicas de modelagem IDEF0 e IDEF3, esta técnica proposta permite a elaboração de modelos conceituais com informações que facilitam a elaboração dos modelos computacionais em projetos de simulação. Além desta utilização, a técnica permite uma documentação de modelos computacionais, facilitando o entendimento do projeto.

A técnica proposta terá como foco o projeto de simulação, porém deverá ser compatível para outros fins, como projetos de melhoria em geral. A Tabela 6.1

apresenta os elementos e a simbologia utilizada. Observa-se que elementos do IDEF0 e IDEF3 foram utilizados, além de um símbolo do fluxograma. Vale destacar que o uso destes símbolos foi adaptado às necessidades encontradas em projetos de simulação.

Tabela 6.1 - Simbologia utilizada na técnica proposta IDEF-SIM

Elementos	Simbologia	Técnica de origem
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)
Funções		IDEF0
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3
Recursos		IDEF0
Controles		IDEF0
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 Regra E	IDEF3
	 Regra OU	
	 Regra E/OU	
Movimentação		Fluxograma
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado		
Ponto final do sistema		
Conexão com outra figura		

A seguir detalha-se a função de cada elemento apresentado:

- a) Entidade: são os itens a serem processados pelo sistema, representando matéria-prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros. Elas podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo e são movimentadas

por meios próprios ou por meio de recursos. Uma vez representada, o símbolo somente aparecerá no momento em que uma nova entidade for criada. Desta forma, torna-se claro o número de entidades a ser utilizada e em que pontos do modelo a entidade sofrerá uma transformação.

- b) Funções: representam os locais onde a entidade sofrerá alguma ação. Entendem-se como funções: postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques, postos de atendimento. Estas funções podem modificar uma entidade, como no caso de postos de trabalho, ou mesmo alterar o ritmo desta entidade no fluxo, como uma espera (fila, estoque).
- c) Fluxo da entidade: direcionamento da entidade dentro do modelo, caracterizando os momentos de entrada e saída da entidade nas funções.
- d) Recursos: representam elementos utilizados para movimentar as entidades e executar funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos. Em um sistema pode haver recursos estáticos ou dinâmicos. Os recursos estáticos não são dotados de movimento. Os recursos dinâmicos, por sua vez, podem se mover sobre um caminho definido.
- e) Controles: regras utilizadas nas funções, como seqüenciamento, regras de filas, programações, entre outros.
- f) Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: estas regras são chamadas de junções, na técnica IDEF3. Dois ou mais caminhos, após uma função, podem ser executados juntos (junção E), ou de forma alternativa (junção OU), ou permitindo ambas as regras (junção E/OU).
- g) Movimentação: representa um deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo. Ao representar este elemento, espera-se encontrar no modelo computacional uma programação específica para este movimento, como tempo gasto e recurso utilizado.
- h) Informação explicativa: utilizado para inserir no modelo uma explicação, com o objetivo de facilitar o entendimento do mesmo.
- i) Fluxo de entrada no sistema modelado: define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo.

- j) Ponto final do sistema: defini o final de um caminho dentro do fluxo modelado.
- k) Conexão com outra figura: utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

Antes da aplicação do IDEF-SIM nos objetos de estudo desta tese, algumas aplicações foram realizadas, com o objetivo de verificar a eficácia da técnica.

O exemplo representado na Figura 6.2 corresponde a um projeto de simulação ainda na fase de modelagem conceitual. Este é um caso hipotético, onde se tem uma representação gráfica inicial do sistema a ser modelado.

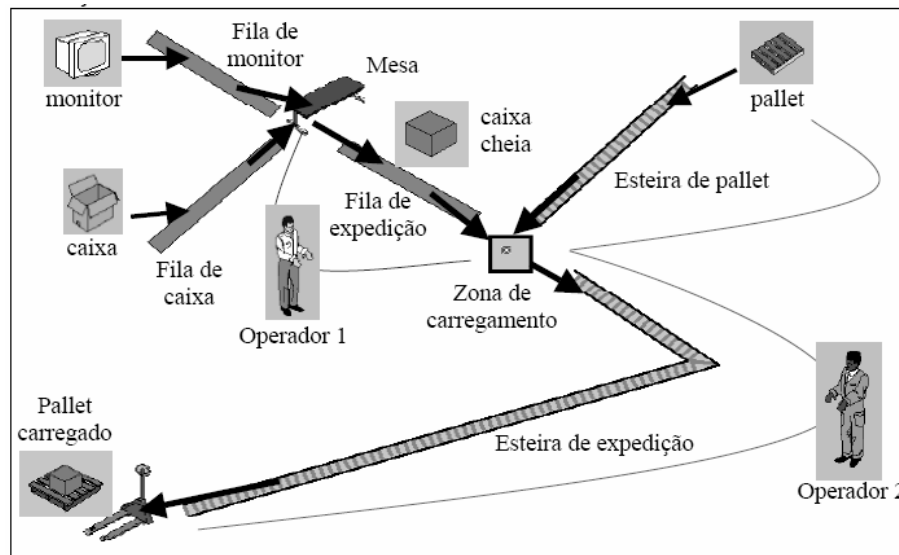


Figura 6.2 – Representação visual do sistema hipotético de manufatura a ser modelado.

Através da técnica IDEF-SIM torna-se possível gerar um modelo conceitual com uma série de informações que irão facilitar o trabalho de desenvolvimento do modelo computacional, como mostram a Figura 6.3 e a Tabela 6.2.

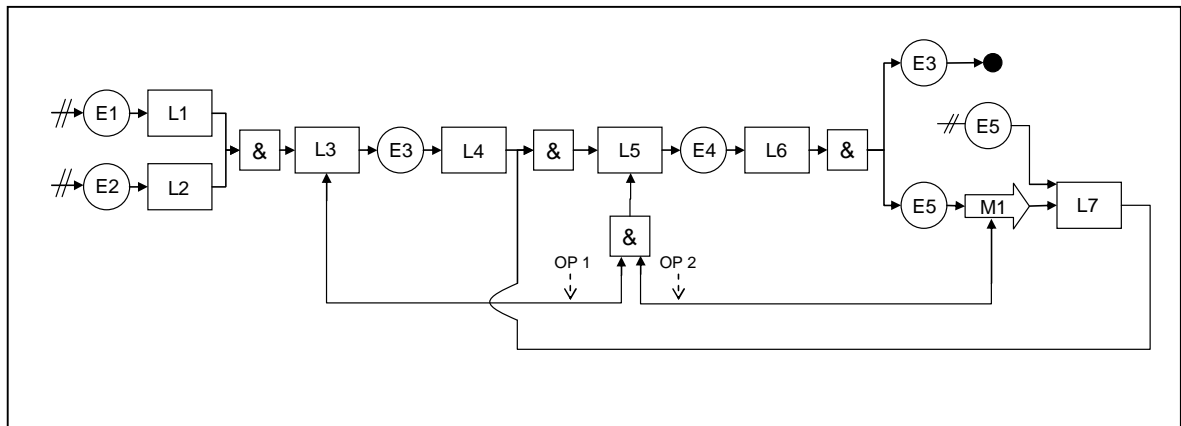


Figura 6.3 - Modelo conceitual do sistema hipotético de manufatura através do IDEF-SIM.

Tabela 6.2 – Entidades e funções presentes na Figura 6.3

ENTIDADES	NOME
E1	Monitor
E2	Caixa
E3	Caixa cheia (= E1+E2)
E4	<i>Pallet</i> carregado (= E3+E5)
E5	<i>Pallet</i> vazio
FUNÇÕES	NOME
L1	Fila de monitor
L2	Fila de caixa
L3	Mesa
L4	Fila de expedição
L5	Zona de carregamento
L6	Esteira de expedição
L7	Esteira de <i>pallet</i>

Observa-se na Figura 6.3 que as entidades E1 (monitor) e E2 (caixa) são entradas do sistema, sendo por isto destacadas com uma seta duplamente riscada. Estas entidades, após passarem pelas suas respectivas filas (L1 e L2), serão trabalhadas em L3 (mesa). A existência da junção “&” antes da função L3 justifica-se pelo fato da função L3 não ser executada caso uma das entidades não esteja à disposição. Uma vez que L3 é executado, a entidade assume a forma de E3 (caixa cheia). A caixa cheia passa pela fila de expedição (L4) e segue à zona de carregamento (L5). A função em L5 só é executada mediante a presença das entidades E3 e E5 (*pallet* vazio). A função

L5 ainda sofre outra condicional: só é executada mediante o trabalho de dois recursos, OP 1 (operador 1) e OP 2 (operador 2).

Porém, ressalta-se que estes recursos não são dedicados, ou seja, são responsáveis por outras funções. O OP 1 ainda é responsável pela função L3, enquanto o OP 2 é responsável também pelo transporte da entidade E5 até à função L7 (esteira de *pallet*). O uso da junção na seta de recurso se mostrou necessária em modelos de simulação, uma vez que a modelagem de movimentos em muitos *softwares* permite a alocação de recursos para tal ação. Uma vez que este recurso esteja já alocado em outra função, o transporte deixa de ser realizado e fica em espera.

Após L5 a entidade assume a forma de E4 (*pallet* carregado) e segue à função L6 (esteira de expedição). Na esteira, a entidade se transforma em E3 e E5, sendo E3 enviado ao final do sistema. No caso de E5, este é transportado pelo OP 2 até a função L7. Existe ainda uma entrada de E5, proveniente de fora do sistema. Os *pallets* vazios (E5) irão abastecer a função L5.

A Figura 6.4 destaca alguns elementos lógicos utilizados no IDEF-SIM, convertidos para o modelo computacional. Para exemplificar esta conversão, utilizou-se o *software* Promodel®.

Regras envolvendo a movimentação, o uso de recursos e controles, além das transformações de entidades, possibilitam ao modelador construir um modelo conceitual mais próximo das exigências de um modelo computacional.

Independente do projeto de simulação, o modelo elaborado através desta técnica pode também ser utilizado em projetos de melhoria, através de estudos de racionalização, por exemplo. A estrutura montada a partir da combinação de elementos do IDEF0 e IDEF3 permite agrupar os pontos fortes destas duas técnicas. O entendimento torna-se facilitado uma vez que estas técnicas já são utilizadas em pesquisas na área de BPM.

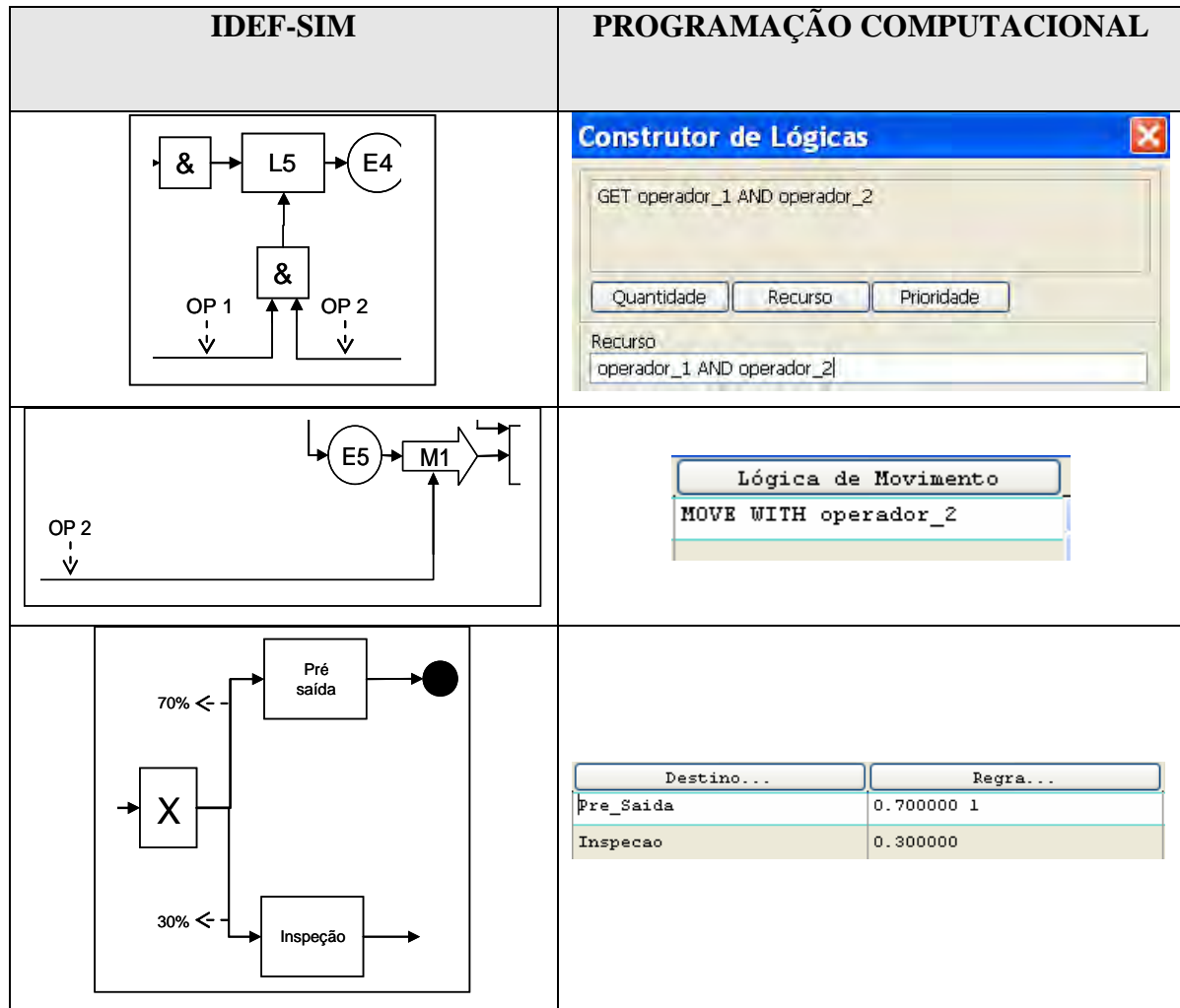


Figura 6.4 – Conversão do IDEF-SIM em modelo computacional, através do *software* Promodel®.

Vale destacar que um detalhamento exagerado do modelo conceitual pode torná-lo de difícil construção e entendimento. Outro cuidado a ser tomado é a não elaboração de uma técnica de modelagem conceitual totalmente voltada às características operacionais de um determinado *software* de simulação. Neste trabalho, utilizou-se o Promodel® para exemplificar a possível conversão de um modelo conceitual em computacional. Os elementos “função”, “entidade”, “movimentação”, “recursos”, “controles” são utilizados em vários *softwares* de simulação, porém com nomes específicos. Outros elementos são mais característicos de determinados *softwares* e por isso não foram utilizados na técnica proposta.

### 6.3 PRIMEIRO OBJETO DE ESTUDO

A seguir serão apresentadas as etapas cumpridas e as conclusões obtidas para o primeiro objeto de estudo deste trabalho. Foram gastos três meses para a coleta de dados e para a modelagem conceitual e computacional. Após este período, freqüentes consultas aos especialistas do processo foram realizadas, até que se obtivesse um modelo verificado e validado.

#### 6.3.1 Modelo conceitual

As visitas ao chão-de-fábrica foram acompanhadas por dois engenheiros responsáveis. Após uma explicação inicial sobre o funcionamento da célula, foram definidos os limites desta. Os limites têm o objetivo de orientar o modelador na confecção do modelo.

Os funcionários da célula também foram entrevistados, durante a jornada normal de trabalho. Para auxiliar em uma posterior validação deste modelo conceitual, outro modelador (aluna de graduação do quarto ano de Engenharia de Produção) também realizou a modelagem. Esta ação propiciou duas visões diferentes, cujo resultado deve ser o mais semelhante possível. As divergências foram então discutidas entre os modeladores, para o encontro de um consenso.

Uma vez confeccionado o modelo, este foi apresentado aos especialistas do processo. Algumas alterações foram propostas, até que se obteve o modelo conceitual final. Este modelo está representado na Figura 6.5 e foi considerado válido pelos especialistas.

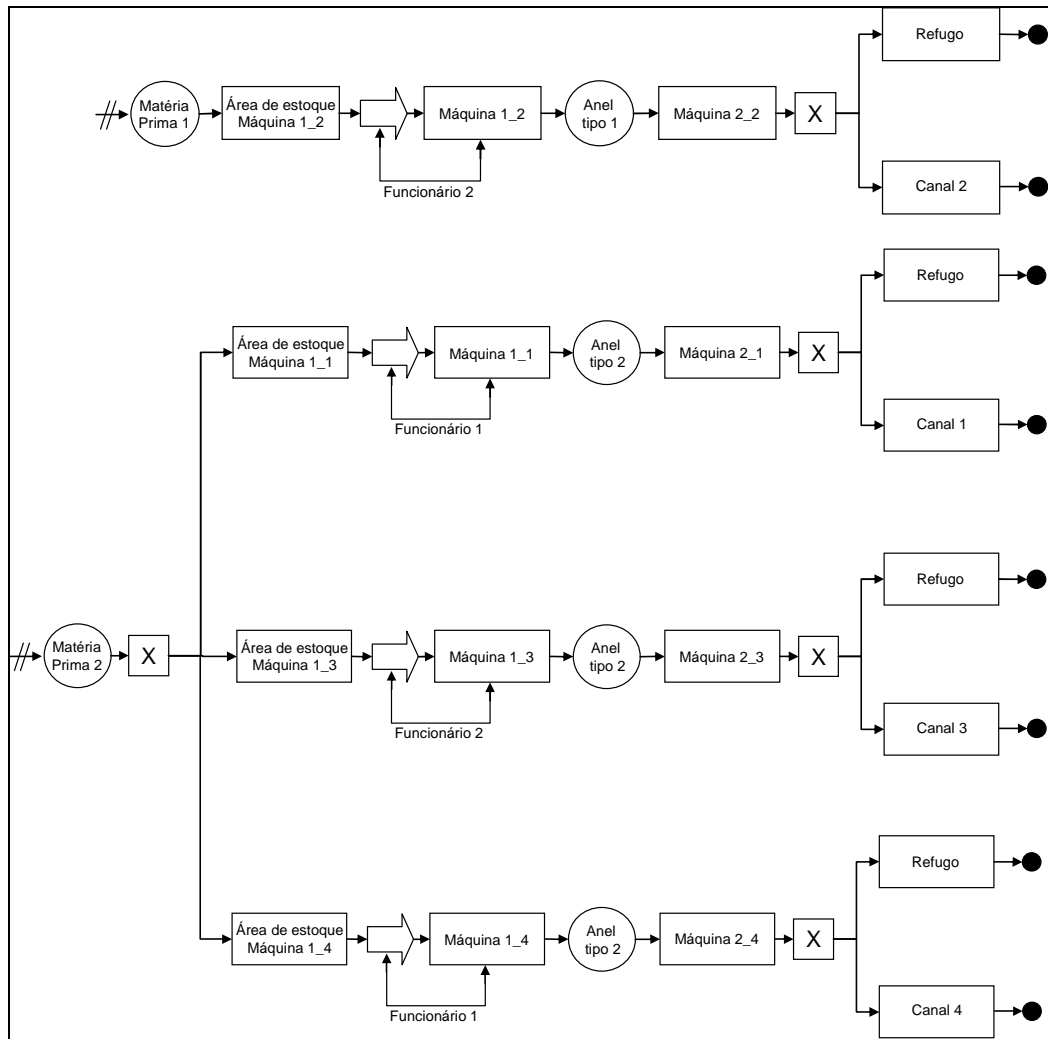


Figura 6.5 – Modelo conceitual do primeiro objeto de estudo.

Duas entidades de entrada foram consideradas no modelo: a matéria-prima 1 e a matéria-prima 2. Ocorrem neste modelo apenas duas transformações de entidades. A matéria-prima é convertida em anel, conforme mostra a Figura 6.5. Dois recursos são utilizados neste modelo: o funcionário 1 e o funcionário 2. Estes funcionários são responsáveis pelo transporte da entidade do posto “Área de estoque 1\_n” até o posto “Máquina 1\_n”. Além do transporte, o funcionário é uma restrição a ser considerada na “Máquina 1\_n”.

Este processo simulado é considerado finalizado quando o anel chega ao “Canal n” (de onde prossegue seu fluxo normal por outros processos da empresa, embora não considerados neste trabalho), ou quando é descartado no refugo.

### 6.3.2 Modelagem dos dados de entrada

Uma vez construído o modelo conceitual, torna-se necessário definir as variáveis de entrada (independentes) e as variáveis de saída (dependentes), de acordo com os objetivos do estudo de simulação.

Os dados foram obtidos através de duas formas: acesso a relatórios de apontamento e cronometragem. No caso de acesso a relatórios de apontamento, o próprio funcionário do processo registra os valores, como por exemplo o tempo gasto de processamento e o número de refugos. Como estes relatórios são constantemente preenchidos, o modelador passa a ter acesso a um banco de dados, permitindo um melhor ajuste a uma distribuição. Porém, algumas variáveis importantes para a simulação podem não fazer parte da rotina de métricas da empresa. Desta forma, o modelador deve coletar estes dados, a partir de contagens ou cronometragens. Neste último caso, o gasto de tempo pelo modelador torna-se muito maior.

Para este primeiro objeto de estudo, foram definidas variáveis estocásticas (um total de 16) e algumas determinísticas. As determinísticas justificam-se nos seguintes casos nesta pesquisa:

- tempos de operação determinados por máquinas automáticas;
- tempos de deslocamentos muito curtos;
- taxa de improdutividade (considerada pela empresa como 12% do tempo de um turno).

Para cada variável de entrada do modelo, considerada estocástica, obteve-se 30 valores. Para os casos onde 30 valores apresentaram-se insuficientes, de acordo com a formulação apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, novos valores foram adicionados à amostra.

Os dados foram cronometrados ao longo de dois turnos. O acesso ao terceiro turno não foi possível.

Após a coleta, estes dados foram tratados com o uso do pacote de estatística Minitab® versão 14. Como todo levantamento de dados está sujeito a valores não

usuais conhecidos como *outliers*, através da construção de diagramas *Box-plot* estes valores foram eliminados antes da realização da inferência estatística.

O *software* de simulação selecionado para esta pesquisa, Promodel<sup>®</sup>, possui em seu pacote um *software* de ajuste de dados, chamado de Stat::Fit. Este *software* apresenta uma ordenação das distribuições que melhor se ajustam aos dados fornecidos.

Dentro desta ordenação para cada variável de entrada, foi observado que a distribuição normal aparecia como opção aceitável. Para verificar esta possibilidade de consideração da distribuição normal, realizou-se o teste de normalidade, para cada variável. Estes testes foram realizados no Minitab. O *software* oferece três testes de normalidade: *Anderson-Darling*, *Ryan-Joiner* (similar ao teste *Shapiro-Wilk*) e *Kolmogorov-Smirnov*.

Como o teste de normalidade indicou a aceitação da hipótese de normalidade dos dados, a entrada de dados destas 16 variáveis foi modelada, através de uma distribuição normal, com os parâmetros média e desvio padrão.

### 6.3.3 Implementação do modelo computacional

De posse do modelo conceitual e da modelagem dos dados de entrada, foi realizada a modelagem computacional, com o *software* Promodel<sup>®</sup> versão 7.0.

A Figura 6.6 apresenta a tela do modelo computacional construído, após a construção sucessiva, incrementando o detalhamento, de 20 modelos.

O tempo de simulação foi de 18 dias (três semanas), com três turnos de oito horas cada (refletindo a jornada adotada pela empresa). Para cada um dos 18 dias realizaram-se dez replicações. Esta quantidade foi inicialmente adotada, para que posteriormente fosse realizada uma análise, onde a conclusão poderia indicar a manutenção destas dez replicações ou mesmo o aumento deste valor.

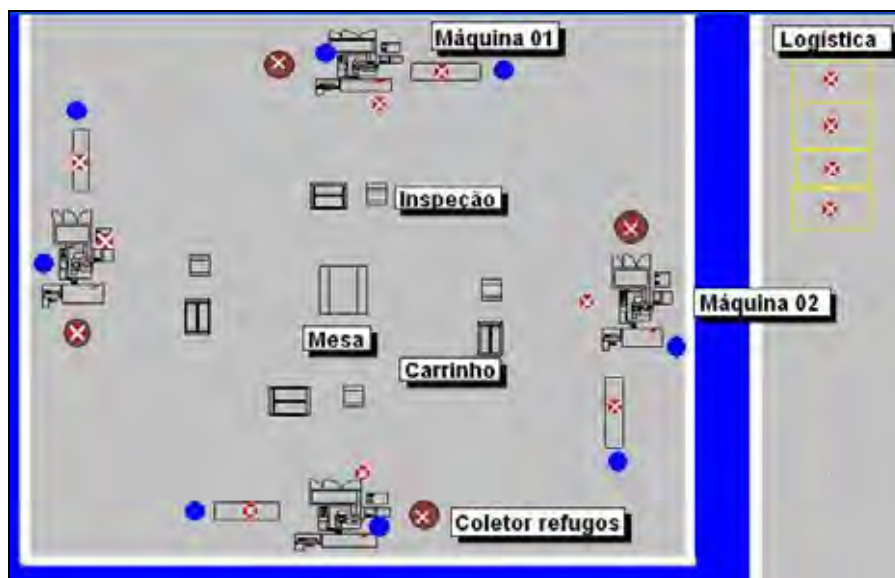


Figura 6.6 – Tela do modelo computacional do primeiro objeto de estudo.

A variável de saída considerada neste modelo foi o total de unidades produzidas por dia na saída da célula. Para melhor entendimento da posição desta variável de saída, pode-se utilizar a Figura 6.5, referente ao modelo em IDEF-SIM. A variável que registra o número de peças produzidas pela célula foi posicionada logo após cada função “Canal n”, sendo  $n=1$  até 4.

Neste objeto de estudo, a simulação foi executada de modo que os dados de saída foram obrigatoriamente coletados durante o estado de regime permanente. Para garantir este estado de regime permanente, Chwif e Medina (2006) apontam três possíveis técnicas:

- a) começar a simulação em um estado próximo daquele esperado em regime permanente;
- b) rodar o modelo por um tempo de simulação longo;
- c) eliminar, dos dados de saída, todos os valores gerado durante o período transitório.

O modelo do primeiro objeto de estudo inicia em estado vazio, ou seja, as máquinas e estoques intermediários estão vazios. Esta é uma situação irreal no sistema. Deve-se, então, desconsiderar os dados gerados nesta fase transitória. Este período a

ser desconsiderado é chamado de período de aquecimento, ou *warm-up*. Segundo Chwif e Medina (2006, p.127), “o modo mais prático para a determinação do tempo de *warm-up* é através da observação”. Dentro deste contexto, observou-se que no primeiro dia simulado, devido ao período transitório, registrou-se valores abaixo dos encontrados durante o período em regime.

Desta forma, os resultados obtidos na simulação do primeiro dia foram desconsiderados.

Duas perguntas podem surgir a partir deste instante:

1. Por que utilizar dez réplicas?
2. A simulação de dez dias já não seria equivalente a dez réplicas?

Por se tratar de uma simulação com variáveis estocásticas, existe a necessidade de se replicar as rodadas, a fim de se obter variáveis de resposta também estocásticas.

Desta forma, ou o pesquisador define uma precisão desejada e busca um número de amostra que garanta esta precisão, ou o pesquisador define um número de amostras e apresenta qual a precisão obtida com a amostra escolhida.

Adotando um nível de significância de 0,05 e dez replicações tem-se, por tabela, um  $t=2,26$  (TRIOLA, 2005). A Tabela 6.3 apresenta as precisões obtidas com dez replicações e a precisão relativa (precisão/média da amostra), para o modelo computacional do primeiro objeto de estudo.

Conforme apresentado no Capítulo 2, Chung (2004) já havia apresentado em seu trabalho a constatação de que uma precisão relativa de 10% (quanto menor, melhor) poderia ser considerada suficiente para trabalhos em simulação.

Quanto à possibilidade de se considerar a simulação de dez dias como equivalente a dez réplicas, pode-se concluir que esta seria uma forma errada de analisar o problema. Como o sistema é não-terminal, o estado do sistema no final de um dia será o estado de início do dia seguinte. Desta forma, se no dia  $n$  o estoque terminou em baixa quantidade, no dia  $n+1$  o estoque vai iniciar no mesmo estado do fim do dia  $n$ .

Tabela 6.3 – Precisão obtida com 10 replicações no primeiro objeto de estudo.

Dia	Média de peças produzidas	Precisão (h) com 10 réplicas	h/média
1	65000	4379,71	6,74%
2	109200	7834,67	7,17%
3	117000	7585,88	6,48%
4	101400	9595,47	9,46%
5	98800	9987,28	10,11%
6	111800	7834,67	7,01%
7	105300	6855,33	6,51%
8	107900	8814,00	8,17%
9	105300	11954,29	11,35%
10	104000	12387,70	11,91%
11	107900	9842,18	9,12%
12	102700	9239,01	9,00%
13	106600	8537,63	8,01%
14	105300	11123,09	10,56%
15	98800	7834,67	7,93%
16	113100	7648,84	6,76%
17	105300	5273,87	5,01%
18	105300	5273,87	5,01%

### 6.3.4 Verificação do modelo computacional

Como apresentado no Capítulo 2, a verificação permite ao pesquisador analisar possíveis erros (*bugs*) na programação do modelo. Ainda no Capítulo 2, algumas técnicas de verificação foram apresentadas. Este modelo foi verificado da seguinte forma:

- o modelo foi sendo construído em etapas, gerando um total de 20 modelos. Somente após a constatação do correto funcionamento do modelo é que novos incrementos foram elaborados, até a finalização na vigésima versão;
- foram inicialmente simulados valores determinísticos, a fim de se verificar a correta lógica do modelo;
- foi utilizado o depurador do *software* Promodel, que apontou os erros de programação;
- as rodadas de teste foram acompanhadas com a função animação habilitada. Esta função permitiu ao pesquisador verificar inconsistências no fluxo e até mesmo o efeito indesejado da fase transitória da simulação, já demonstrada anteriormente.

- foram inseridos alguns contadores ao longo do modelo, para uma mensuração local de resultados. Desta forma, alguns erros puderam ser observados.

Um exemplo do uso da animação em prol da verificação do modelo é a observação dos sinalizadores de estado das *locations* (locais). Na forma de pequenos círculos, estes sinalizadores mostraram momentos onde as máquinas estavam em operação, ou mesmo sem produzir. Alguns erros puderam ser corrigidos mediante observação destes sinalizadores, representado na Figura 6.7 pelo pequeno círculo.



Figura 6.7 – Sinalizador demonstrando o estado da máquina

### 6.3.5 Validação do modelo computacional

Antes do uso de técnicas estatísticas, foi realizada a validação face-a-face, onde o modelo foi apresentado a especialistas do sistema. Através do uso da animação gráfica, os especialistas puderam avaliar o comportamento do modelo. Neste teste, o modelo foi validado.

Os testes estatísticos utilizados foram representados no fluxograma construído no Capítulo 2 deste trabalho, e re-colocado neste item na Figura 6.8.

Para este teste, torna-se necessário comparar os valores obtidos na simulação e os valores reais. Neste caso, foi comparada a variável de saída “número de peças produzidas”. Portanto, para cada um dos 18 dias simulados, obteve-se a produção real do dia. Tem-se então o valor real para o dia  $n$ , comparado com o valor simulado médio (das dez réplicas) para o dia  $n$ .

Os dados do primeiro objeto de estudo foram analisados através da construção de diagramas *Box-plot*, no *software* Minitab. Foram eliminados dois dias considerados *outliers*, o que acarretou a eliminação dos valores simulados destes dias também, para que os dois conjuntos comparados tivessem o mesmo número de valores.

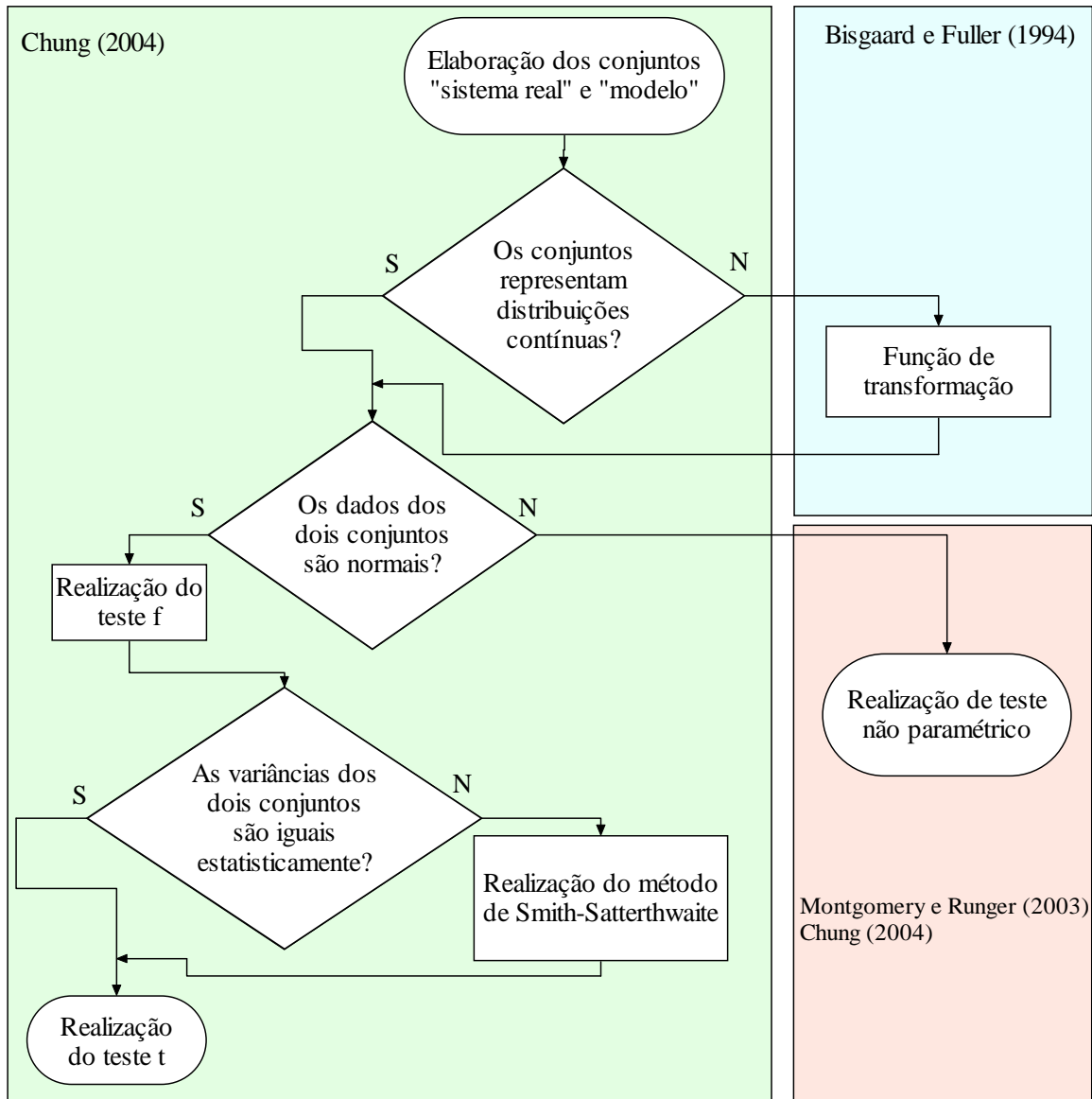


Figura 6.8 – Fluxograma utilizado para validação estatística dos modelos.

A Tabela 6.4 representa os dados referentes ao número de peças produzidas para o primeiro objeto de estudo, nos 16 dias considerados, simulado e real.

Segundo a Figura 6.8, deve-se avaliar se os dados a serem testados representam distribuições contínuas ou distribuições discretas. Isto deve ocorrer pois as técnicas

empregadas são válidas para dados contínuos. No entanto, é comum em sistemas de manufatura encontrar dados de saída de modelos discretos, como por exemplo, o total de peças produzidas por dia. Neste caso, eles podem ser modelados por uma distribuição discreta de probabilidade.

Tabela 6.4 – Número de peças produzidas no primeiro objeto de estudo, simulado e real.

OBS	Simulado (peças produzidas/dia)	Real (peças produzidas/dia)
1	109200	112084
2	101400	73122
3	98800	116479
4	111800	89287
5	105300	97275
6	107900	91724
7	105300	131196
8	104000	92398
9	107900	100895
10	102700	95401
11	106600	92836
12	105300	101901
13	98800	86760
14	113100	106400
15	105300	90818
16	105300	109323

Porém, alguns autores, como apresentado no Capítulo 2 deste trabalho, consideram que distribuições discretas com um número razoável de dados podem ser trabalhadas como contínuas.

Uma vez que é conhecida a distribuição discreta de probabilidade para os dados das amostras, podem-se transformar estes dados de modo que seja possível conseguir uma variância aproximadamente constante para o número de peças produzidas por dia.

Os autores Bisgaard e Fuller (1994) propuseram uma transformação nestes dados, como já apresentado no Capítulo 2. A função de transformação para casos de distribuição de Poisson é a raiz quadrada dos dados.

Aplicado a função raiz quadrada nos dados simulados e reais, verificou-se se os novos conjuntos de dados (reais e simulados) poderiam ser representados por uma distribuição normal. Caso o teste de normalidade não validasse esta hipótese, métodos não paramétricos deveriam ser utilizados.

As Figuras 6.9 e 6.10 demonstram a realização do teste de normalidade, através do Minitab, para os dados simulados e reais, do primeiro objeto de estudo. Vale lembrar que os dados presentes nas Figuras 6.9 e 6.10 já passaram pela função de transformação proposta por Bisgaard e Fuller (1994).

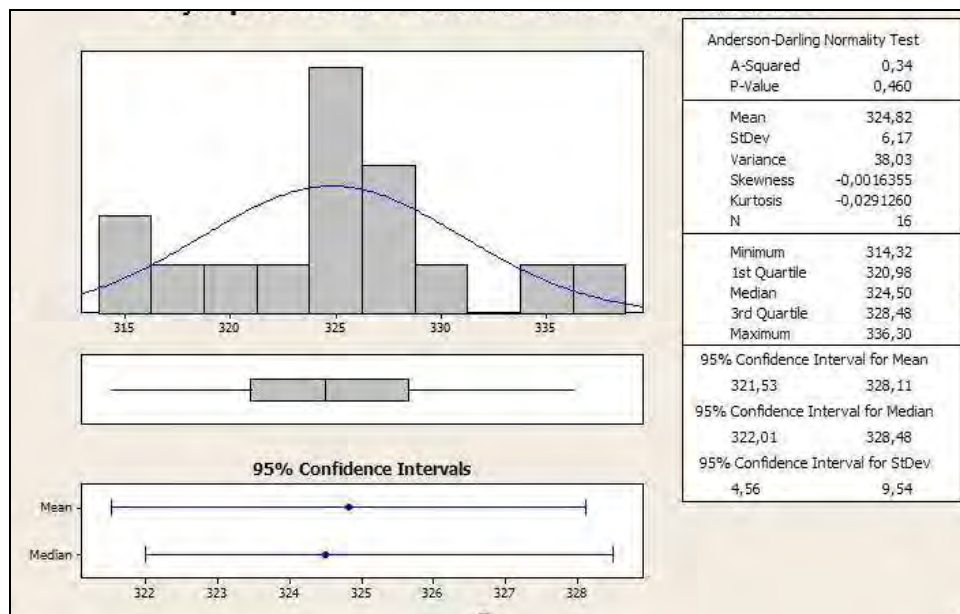


Figura 6.9 – Teste de normalidade, realizado no Minitab, para o conjunto de dados gerados na simulação do primeiro objeto de estudo.

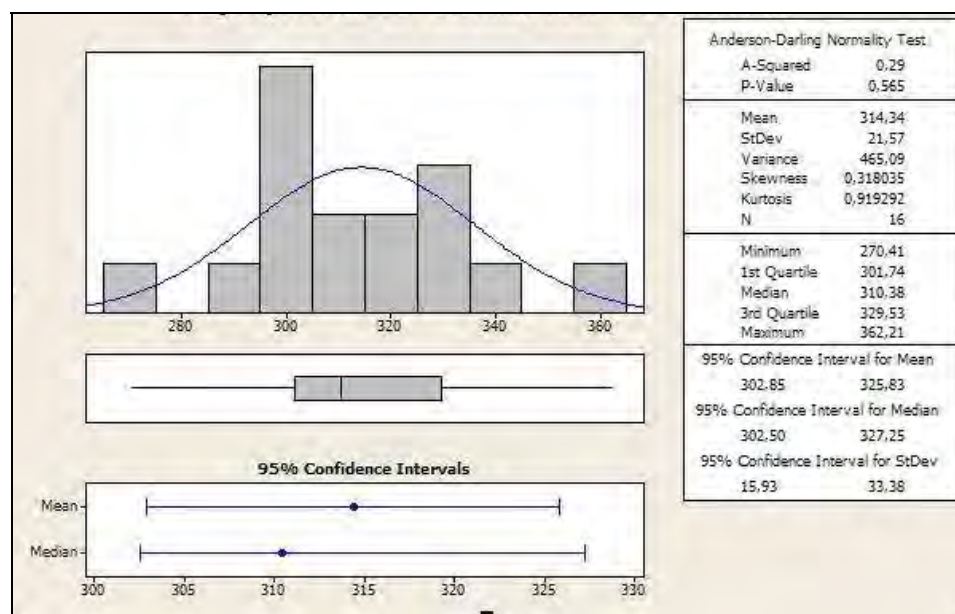


Figura 6.10 – Teste de normalidade, realizada no Minitab, para o conjunto de dados do sistema real do primeiro objeto de estudo.

Neste teste, os *p-values* encontrados foram 0,460 e 0,565. Em ambos os casos, como o valor de *p-value* é maior que o nível de significância 0,05, se aceita a hipótese de normalidade para os dados.

Realizou-se o teste *f*, comparando a variância dos dados do sistema e dos dados do modelo. Tem-se então a seguinte hipótese nula: a variância de ambos os conjuntos de dados (sistema real e modelo) é igual. A hipótese alternativa aponta para a não igualdade de variância entre os conjuntos. Maiores detalhes deste teste podem ser encontrados no Capítulo 2 deste trabalho.

Segundo Chung (2004), o primeiro passo é dividir o valor da variância do conjunto de dados com a maior variância pelo valor da variância do conjunto de dados com a menor variância. Têm-se então as seguintes informações:

- $(S^2_{\text{maior}}) / (S^2_{\text{menor}}) = (465,09/38,03) = 12,228$ ;
- $f_{\text{crítico}} = 2,403$  (considerando um nível de significância de 0,05, e o número de graus de liberdade do numerador e do denominados como 15).

Como o teste estatístico (12,228) é maior que o  $f_{\text{crítico}}$  (2,403), **rejeita-se** a hipótese nula de que a variância de ambos os conjuntos de dados (sistema real e simulado do primeiro objeto de estudo) seja igual. Tal rejeição também pode ser observada na Figura 6.11.

Como não se podem considerar as variâncias dos dois conjuntos iguais, realiza-se o teste de Smith-Satterthwaite, apresentado por Chung (2004). Este teste também está melhor detalhado no Capítulo 2 deste trabalho.

Utilizando-se a equação (2.4), apresentada no Capítulo 2, determina-se o número de graus de liberdade a ser considerado, ou seja; 17,437. Tomando uma postura conservadora, arredonda-se o valor para 18.

Utilizando-se a equação (2.5), determina-se o valor do teste *t*. Antes disto, tem-se que o valor de  $t_{\text{crítico}}$ , para 18 graus de liberdade e nível de significância de 0,05 é de 2,10 (TRIOLA, 2005). O valor do teste *t* calculado é de 1,869.

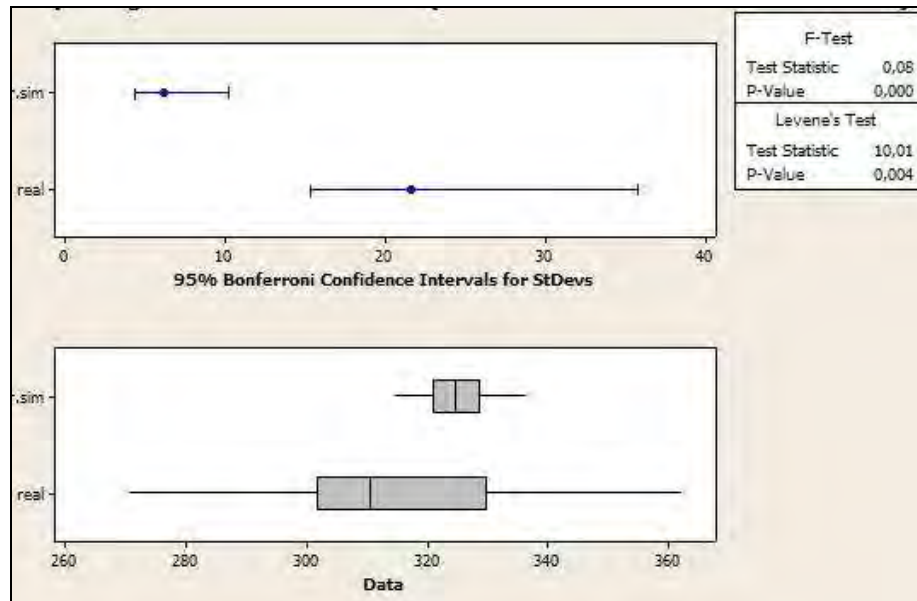


Figura 6.11 – Verificação da não igualdade de variâncias, pelo software Minitab, entre o conjunto de dados reais e simulados do primeiro objeto de estudo.

Segundo Chung (2004), como o valor de  $t$  calculado (1,869) está entre o intervalo de  $\pm t_{\text{critico}}$  (2,10), não se pode rejeitar a hipótese nula: a média dos dois conjuntos é igual. Tal avaliação também poderia ser feita no *software* Minitab. Uma vez que as variâncias não podem ser assumidas como iguais, desmarca-se a opção destacada na Figura 6.12.

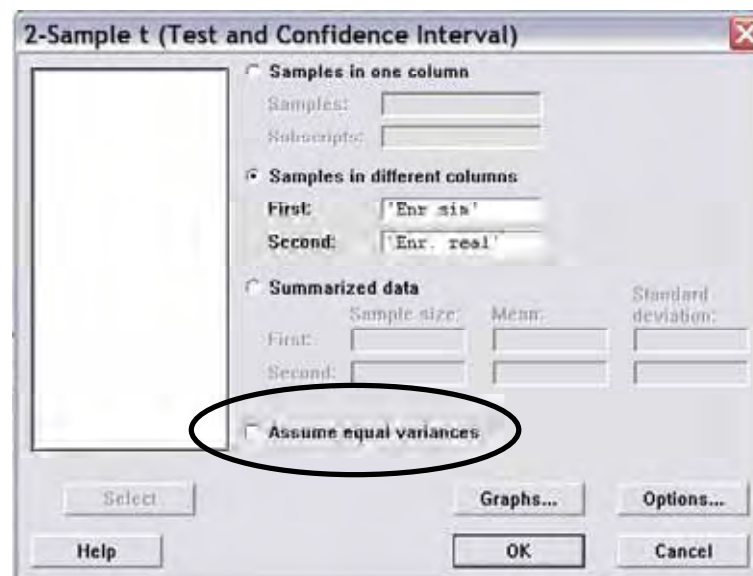


Figura 6.12 – Teste  $t$  no software Minitab, assumindo a não igualdade entre as variâncias dos conjuntos.

Prosseguindo com teste, tem-se a Figura 6.13, confirmando a aceitação da validade no teste  $t$ , com o  $p$ -value maior que 0,05.

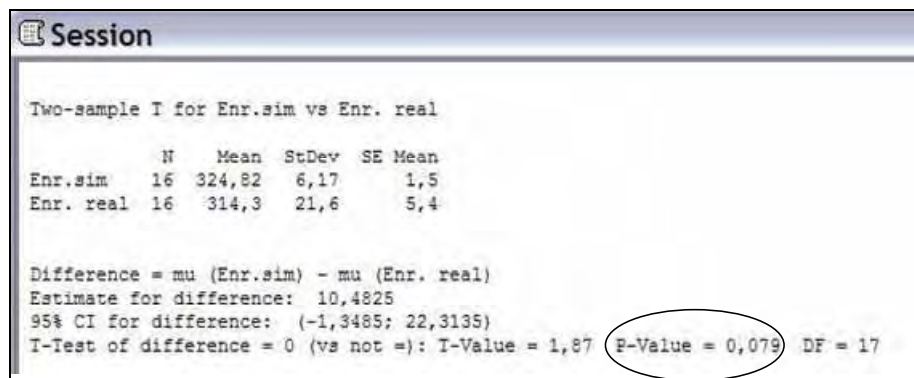


Figura 6.13 – Resultado final do teste  $t$  no Minitab, para os conjuntos de dados simulados e reais, do primeiro objeto de estudo.

Portanto, tem-se a comprovação por técnicas estatísticas de que o modelo de simulação construído no computador é uma boa representação do sistema real.

Caso as duas amostras (real e simulada), ou uma delas não pudesse ser aproximada por uma normal, tornar-se-ia necessário utilizar técnicas não paramétricas.

Um dos possíveis testes é o de Mann-Whitney, que testa a hipótese nula de que as duas populações têm medianas iguais.

Como curiosidade, vale destacar que durante o processo de validação, experimentou-se realizar os testes com somente uma réplica (ao invés de dez). Após a transformação proposta por Bisgaard e Fuller (1994), o conjunto de dados simulados com apenas uma réplica para os 16 dias não foi aceito no teste de normalidade, implicando em um teste não paramétrico. A execução deste teste (Mann-Whitney) também confirmou a validade do modelo.

### 6.3.6 Modelagem dos modos de falha

A partir deste momento, será utilizada uma definição apresentada por Moubray (2000). No trabalho do referido autor, todo ativo possui uma função, e a não obtenção desta função caracteriza uma falha funcional. Todos os elos com comportamento falha/causa são considerados modos de falha.

Não é objetivo deste trabalho discutir as relações falha/causa, ou seja, não se avaliará se o evento chamado de “falha” pela empresa realmente corresponde a uma falha funcional ou simplesmente um modo de falha. Desta forma, utilizou-se o termo modo de falha, como mostra a Figura 6.14.

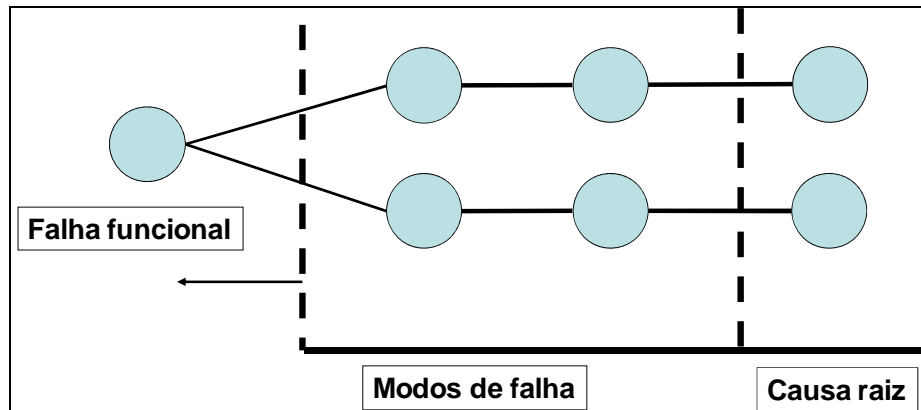


Figura 6.14 – Utilização do conceito de modo de falha.

Os dados referentes aos modos de falha foram obtidos através de duas formas: entrevistas com especialistas e consulta a banco de dados. O banco de dados da empresa referente aos modos de falha é abastecido segundo apontamentos realizados pelos próprios funcionários das células. Desta forma, é registrado o modo de falha (os nomes dos modos de falha já foram previamente padronizados), o turno de ocorrência do modo de falha e o efeito deste modo de falha. Os especialistas foram consultados para maiores esclarecimentos sobre os eventos analisados.

Os dados referentes aos modos de falha do primeiro objeto de estudo compreendem um período de cinco meses, sendo de agosto a dezembro de 2007, considerando três turnos de trabalho diários e um total de 3288 horas (mês de dezembro com quinze dias). Quatro modos de falha foram identificados neste período, como demonstrado a seguir.

a) Modo de falha A: Ausência não justificada do operador

Este modo de falha caracteriza-se pela situação onde o funcionário da célula não está no posto de trabalho e a justificativa para tal ausência não está padronizada no sistema. Os recursos afetados por este modo de falha são os funcionários 1 e 2. Não foi

observado nenhum caso no período analisado onde este modo de falha tenha ocorrido com os dois recursos, ao mesmo tempo.

Este modo de falha é registrado no banco de dados através do tempo em que o funcionário permaneceu ausente do posto de trabalho. Desta forma, fica caracterizado o efeito deste modo de falha como a paralisação do recurso funcionário.

Através de uma consulta ao banco de dados da empresa, foram observadas 45 ocorrências deste modo de falha, distribuídos entre os três turnos da empresa. Utilizando-se o *software* Minitab, analisou-se a necessidade de eliminação de algum valor considerado *outlier*. Nenhum valor foi eliminado.

Através do número total de horas consideradas no período e o número de ocorrências deste modo de falha, determinou-se o tempo médio entre falhas (TMEF), como resume a Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha A

<b>Total de horas</b>	<b>3288</b>
<b>Número de ocorrências</b>	<b>45</b>
<b>TMEF (h)</b>	<b>73,07</b>

Novamente o *software* Minitab foi utilizado para a verificação da normalidade dos dados coletados. Caso o teste confirme a normalidade, os dados poderão ser bem representados por uma distribuição normal. A Figura 6.15 demonstra este teste, rejeitando a hipótese de normalidade dos dados. Vale lembrar que neste caso os dados referem-se aos tempos de ausência do funcionário, em cada registro de ocorrência do modo de falha A.

O valor de *p-value* indica a rejeição da hipótese de normalidade, o que indica a necessidade de outra distribuição para a representação dos dados. *Softwares* como o próprio *Minitab* ou o *Stat:Fit* realizam um processo chamado de *best fitting*, apontando distribuições que podem representar os dados. Estes *softwares* não utilizam o mesmo procedimento para o *best fitting*. Para exemplificação, os resultados dos dois *softwares* seguem representados nas Figuras 6.16 e 6.17.

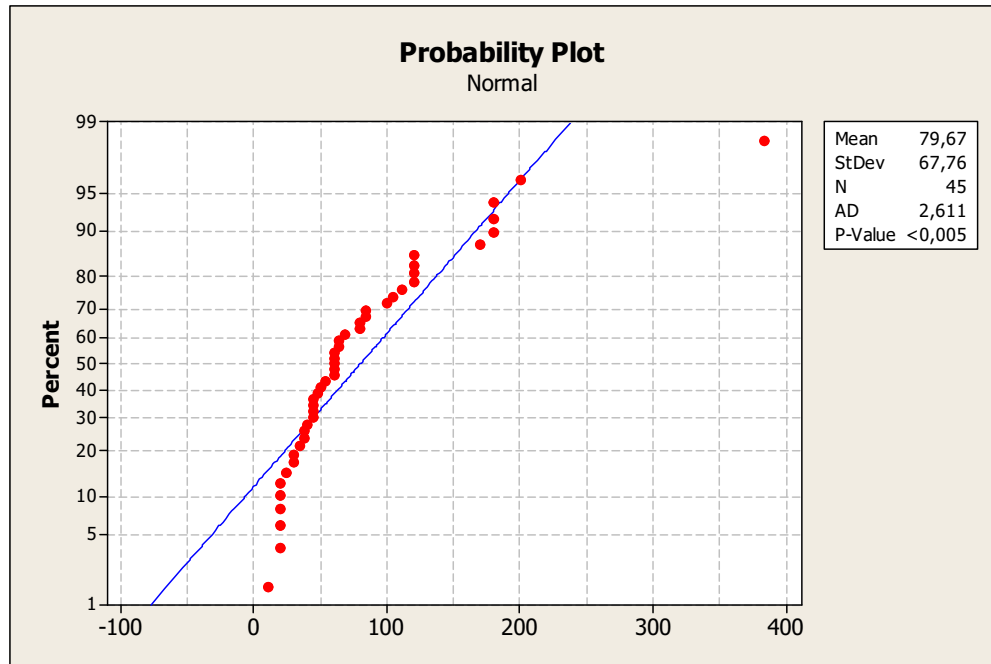


Figura 6.15 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência não justificada do operador”.

Distribution	Anderson-Darling (adj)	Correlation Coefficient
Weibull	1,585	0,968
Lognormal	0,532	0,992
Exponential	2,623	*
Loglogistic	0,536	0,991
3-Parameter Weibull	0,880	0,982
3-Parameter Lognormal	0,533	0,992
2-Parameter Exponential	0,993	*
3-Parameter Loglogistic	0,534	0,991
Smallest Extreme Value	7,258	0,768
Normal	2,904	0,869
Logistic	2,543	0,877

Figura 6.16 – Distribuições candidatas apontadas pelo Minitab, aos dados do modo de falha “Ausência não justificada do operador”.

No caso do Minitab, deve-se dar preferência às candidatas com menor valor de ajuste de Anderson-Darling e maior valor do coeficiente de correlação. Neste caso, a Lognormal apresenta-se como melhor candidata.

distribution	rank	acceptance
Pearson 6(10., 80.8, 2.48, 3.78)	100.	do not reject
LogLogistic(10., 1.96, 50.1)	98.3	do not reject
Lognormal(10., 3.9, 0.884)	91.9	do not reject
Inverse Gaussian(10., 64., 69.7)	78.7	do not reject
Exponential(10., 69.7)	68.2	do not reject
Gamma(10., 1.58, 44.)	63.3	do not reject
Weibull(10., 1.2, 76.2)	62.3	do not reject
Inverse Weibull(10., 1.16, 3.18e-002)	50.5	do not reject
Pearson 5(10., 1.43, 47.7)	49.2	do not reject
Beta(10., 1.29e+003, 1.4, 23.6)	37.9	do not reject
Erlang(10., 2., 44.)	4.13e-002	reject
Pareto(10., 0.557)	4.16e-004	reject
Rayleigh(10., 69.1)	4.28e-005	reject
Power Function(10., 6.03e+003, 0.208)	0.	reject
Triangular(9., 395, 9.)	0.	reject
Uniform(10., 384)	0.	reject
Chi Squared(10., 50.2)	0.	reject
Johnson SB	no fit	reject

Figura 6.17 – Distribuições candidatas apontadas pelo Stat:Fit, aos dados do modo de falha “Ausência não justificada do operador”.

A Figura 6.17 demonstra a aceitação das candidatas, segundo os critérios do Stat:Fit. Analisando as Figuras 6.16 e 6.17, selecionou-se a distribuição Lognormal, para a representação destes dados.

Um maior detalhamento dos testes realizados no *software* Stat:Fit pôde ser obtido. É possível assim demonstrar a aceitação da distribuição Lognormal para a representação do modo de falha “Ausência não justificada do operador”, como mostra a Figura 6.18.

Todo este procedimento foi realizado para todos os modos de falha analisados. A seguir serão apresentados os demais modos de falha, com um resumo das constatações observadas.

#### b) Modo de falha B: Ausência justificada do operador

Este modo de falha caracteriza-se pela situação onde o funcionário da célula não está no posto de trabalho e a justificativa para tal ausência está padronizada no sistema. Pode-se citar como exemplo: idas ao posto medido, comemoração de aniversário, chamados de urgência. Assim como no primeiro modo de falha apresentado, os recursos afetados por este modo de falha também são os funcionários 1 e 2.

distribution	Chi Squared	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling
Lognormal[10., 3.9, 0.884]	1.2 [6]	9.75e-002	2.39
<b>detail</b>			
<b>Lognormal</b>			
minimum =	10. [fixed]		
mu =	3.89593		
sigma =	0.884435		
<b>Chi Squared</b>			
total classes		7	
interval type		equal probable	
net bins		7	
chi**2		1.2	
degrees of freedom		6	
alpha		5.e-002	
chi**2[6,5.e-002]		12.6	
p-value		0.977	
result		DO NOT REJECT	
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>			
data points		45	
ks stat		9.75e-002	
alpha		5.e-002	
ks stat[45,5.e-002]		0.198	
p-value		0.749	
result		DO NOT REJECT	
<b>Anderson-Darling</b>			
data points		44	
ad stat		2.39	
alpha		5.e-002	
ad stat[5.e-002]		2.49	
p-value		5.67e-002	
result		DO NOT REJECT	

Figura 6.18 – Não rejeição da distribuição lognormal para representação dos dados da “Ausência não justificada do operador”, segundo o Stat:Fit, levando-se em consideração três critérios (Chi-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling).

Este modo de falha é registrado no banco de dados através do tempo em que o funcionário permaneceu ausente do posto de trabalho. Desta forma, também fica caracterizado o efeito deste modo de falha como a paralisação do recurso funcionário.

Foram observadas 18 ocorrências deste modo de falha, distribuídos entre os três turnos da empresa. Utilizando o *software* Minitab, analisou-se a necessidade de eliminação de algum valor considerado *outlier*. Nenhum valor foi eliminado.

Este modo de falha poderia ser considerado igual ao modo de falha A. Decidiu-se considerá-lo separadamente, pois as ações preventivas são distintas neste caso. O funcionário ausente com motivo justificado acarreta efeitos na produção que podem ser evitados ou minimizados através de procedimentos da própria empresa. Já no caso do modo de falha onde o funcionário se ausenta sem justificativa, ações preventivas referentes a treinamentos motivacionais podem ser sugeridos.

Através do número total de horas consideradas no período e o número de ocorrências deste modo de falha, determinou-se o tempo médio entre falhas (TMEF), como resume a Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B.

<b>Total de horas</b>	3288
<b>Número de ocorrências</b>	18
<b>TMEF (h)</b>	182,67

A Figura 6.19 demonstra o teste de normalidade para os dados do modo de falha “Ausência justificada do operador”.

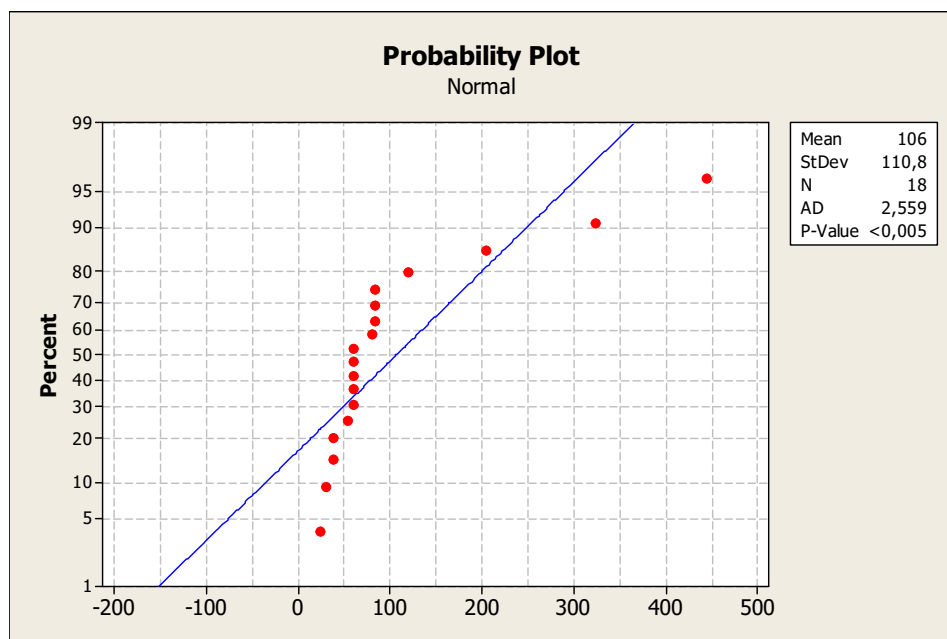


Figura 6.19 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência justificada do operador”.

O valor do *p-value* indica a rejeição da hipótese de normalidade, o que indica a necessidade de outra distribuição para a representação dos dados.

A Figura 6.20 demonstra a determinação da Lognormal para a representação destes dados.

c) Modo de falha C: Falta de matéria-prima

Este modo de falha caracteriza-se pela ausência de matéria-prima abastecendo as máquinas da célula. Como efeito, as máquinas são paralisadas até a resolução do problema. Durante o período analisado, apenas quatro ocorrências foram constatadas, como mostra a Tabela 6.7.

<b>Lognormal</b>	
minimum	= 24. [fixed]
mu	= 3.89402
sigma	= 1.04178
<b>Chi Squared</b>	
total classes	5
interval type	equal probable
net bins	3
chi**2	2.33
degrees of freedom	2
alpha	5.e-002
chi**2[2,5.e-002]	5.99
p-value	0.311
result	DO NOT REJECT
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>	
data points	18
ks stat	0.202
alpha	5.e-002
ks stat[18,5.e-002]	0.309
p-value	0.404
result	DO NOT REJECT
<b>Anderson-Darling</b>	
data points	17
ad stat	0.519
alpha	5.e-002
ad stat[5.e-002]	2.49
p-value	0.728
result	DO NOT REJECT

Figura 6.20 – Não rejeição da distribuição lognormal para representação dos dados da “Ausência justificada do operador”, segundo o Stat:Fit.

Tabela 6.7 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha C.

<b>Total de horas</b>	3288
<b>Número de ocorrências</b>	4
<b>TMEF (h)</b>	822

Devido ao pequeno número de dados, foi considerada uma distribuição triangular. Segundo Chwif e Medina (2006), a distribuição triangular pode ser utilizada para modelar situações em que não se conhece a forma exata da distribuição, mas se tem estimativas para o menor valor, o valor mais provável de ocorrer e o maior valor. Através da análise dos dados e da confirmação dos especialistas do processo, o menor tempo de paralisação da máquina por falta de material é de 44 minutos, enquanto o maior tempo de 180. O resultado mais provável é de 70 minutos.

d) Modo de falha D: Problema de ajuste na máquina

Este modo de falha pode ser caracterizado pela interrupção na produção normal da máquina para ajustes. O ajuste é realizado até que o produto seja aceito dentro das características pré-determinadas pela qualidade. Durante o período analisado, foram constatadas 365 paralisações para ajuste, como mostra a Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha D.

<b>Total de horas</b>	3288
<b>Número de ocorrências</b>	365
<b>TMEF (h)</b>	9

No banco de dados da empresa não foi registrado o tempo gasto pelo funcionário para completar o ajuste da máquina. Desta forma, através de algumas medições realizadas pela própria empresa em estudos anteriores, considerou-se uma distribuição normal para representar este modo de falha, com um tempo médio de paralisação da máquina de 60 minutos e um desvio padrão de 20 minutos. Esta consideração seguiu a distribuição utilizada pela empresa, pelo fato da não realização da cronometragem neste caso, pelo autor.

### 6.3.7 Programação dos efeitos dos modos de falha

Uma vez definidos os modos de falha e modelados estatisticamente, parte-se para a modelagem computacional destes modos de falha sobre o modelo computacional do primeiro objeto de estudo. O primeiro passo é identificar no modelo os elementos que serão afetados pelos modos de falha. Elementos como variáveis de entrada ou mesmo parâmetros do modelo podem ser programados. Estas variáveis ou parâmetros estão relacionados a funções ou recursos utilizados no modelo, como mostra a Figura 6.21. A visão geral desta associação está representada na Figura 6.22.

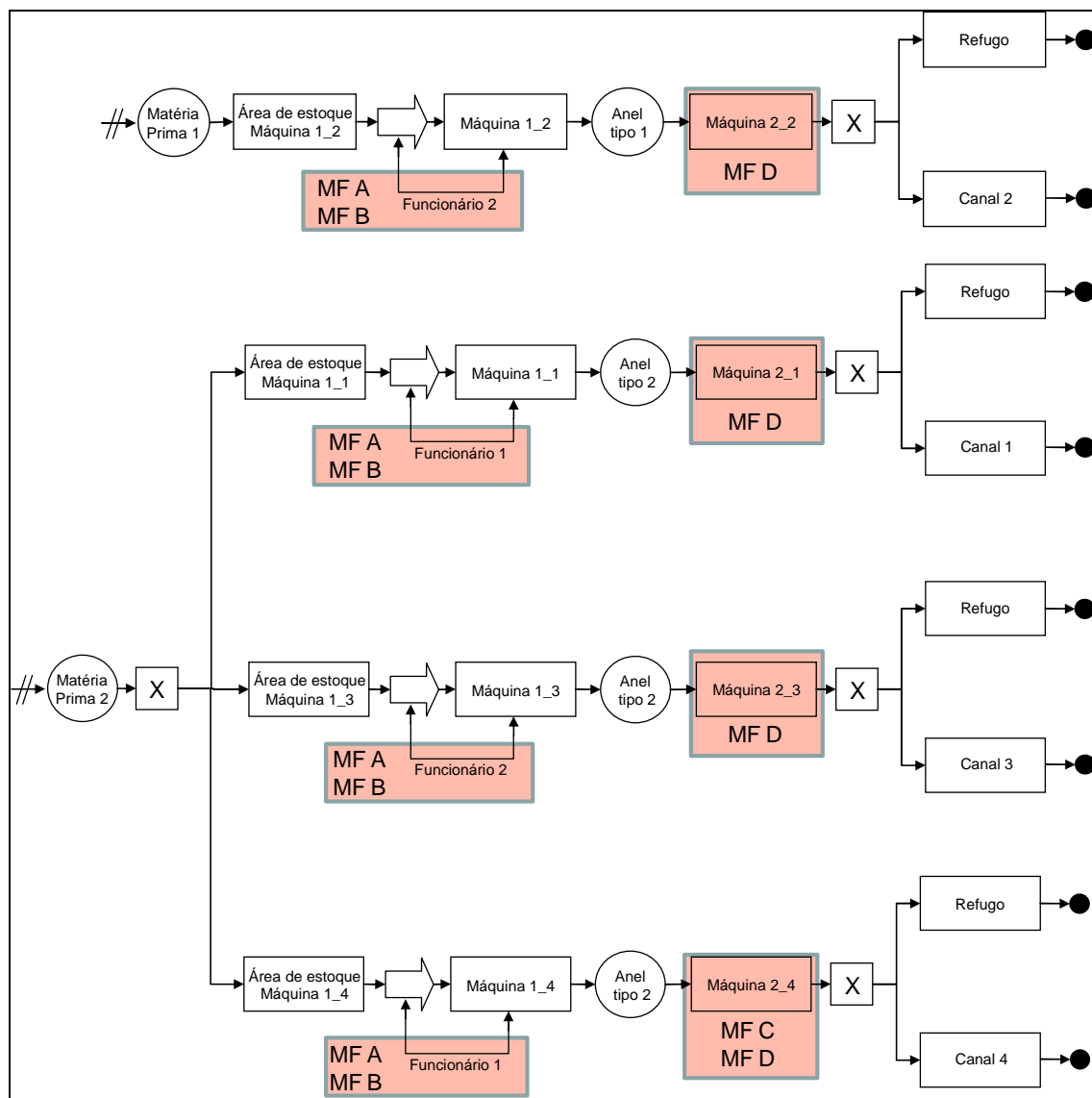


Figura 6.21 – Pontos de programação dos efeitos dos modos de falha referentes ao primeiro objeto de estudo (MF = modo de falha).

A Figura 6.21 já demonstra uma das funcionalidades obtidas na técnica de modelagem desenvolvida, o IDEF-SIM. No próprio modelo conceitual representam-se os pontos onde cada efeito do modo de falha deverá ser programado.

Cada um dos efeitos foi verificado no modelo através do comando “DISPLAY”. Este comando, posicionado junto à programação do efeito, permite, durante a fase de animação da simulação, verificar o tempo de parada de cada máquina ou recurso. Replicando a simulação, é possível obter um conjunto de dados demonstrados pelo DISPLAY, permitindo observar a ação da distribuição selecionada. Cada um dos efeitos foi verificado individualmente, antes da fase dos experimentos.

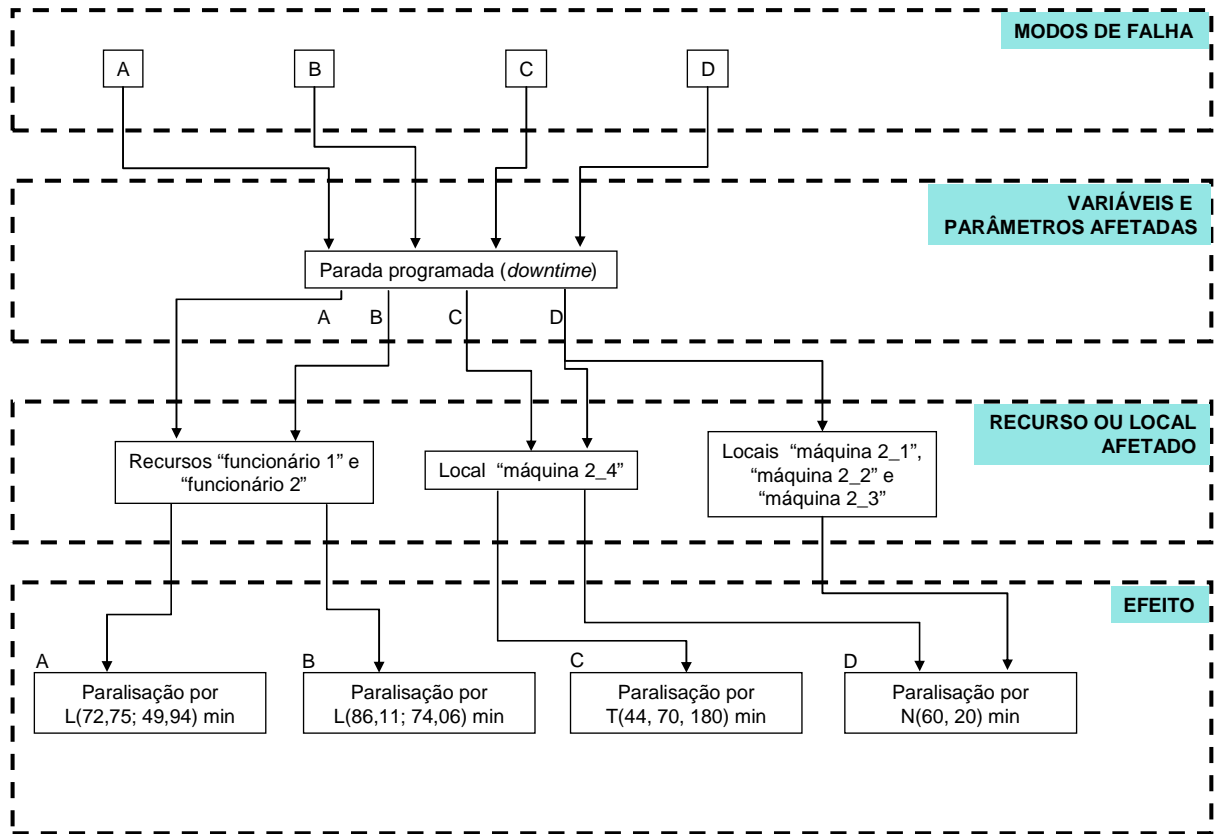


Figura 6.22 – Ação dos modos de falha sobre o modelo de simulação do primeiro objeto de estudo.

Cada um dos efeitos listados na Figura 6.22 pôde ficar programado no modelo computacional, sendo ativado e desativado no momento desejado. Um dos artifícios utilizados foi a ativação ou não das linhas de comando. Desta forma economizou-se tempo na fase de experimentos, pois o modo de falha pôde ser ativado ou desativado apenas com a mudança de um campo, como mostra a Figura 6.23.

Logic...	Disable
## DISPLAY "Falha C "	Yes
## DISPLAY "Falha D"	No

Figura 6.23 – Exemplo de ativação dos modos de falha no modelo computacional.

Uma forma de verificação utilizada foi a simulação do modelo sem falhas programadas e a simulação do modelo com falhas programadas, porém com estas desativadas. Comparando-se os dados de resposta (número de peças produzidas pela célula), as mesmas respostas deveriam ser encontradas nos dois casos, partindo da mesma semente de números aleatórios. Esta verificação é importante para assegurar

que a programação das falhas não tenha alterado por engano outro ponto do modelo. Esta verificação foi feita com sucesso.

### **6.3.8 Análise do cenário 1**

Este cenário apresenta o primeiro objeto de estudo, com os efeitos dos modos de falha programados e com um tempo simulado de oito horas. Este tempo corresponde a um turno de trabalho. A própria empresa registra a produção após o término de cada turno de oito horas, o que justifica a importância do reconhecimento do efeito dos modos de falha sobre a quantidade produzida neste período de tempo.

Como as quatro máquinas presentes nesta célula são iguais, selecionou-se apenas uma máquina neste cenário e analisaram-se os efeitos dos modos de falha sobre a produção desta máquina selecionada. Da mesma forma, foi selecionado apenas um funcionário desta célula, sendo este o funcionário que interage com a máquina selecionada. A variável de resposta mensurada neste cenário foi o número de produtos fabricados pela máquina selecionada.

Neste período de oito horas simuladas, cada um dos quatro modos de falha ocorreu uma única vez, em um momento aleatório. Portanto, neste cenário não se levou em consideração o fator ocorrência, mas sim o fator gravidade do modo de falha. Como cada um dos modos de falha foi programado para ocorrer uma vez dentro do período simulado, torna-se possível ordenar estes modos de falha de acordo com a gravidade das suas conseqüências.

Segundo a própria definição utilizada na FMEA, os parâmetros ocorrência e gravidade são analisados de forma isolada. Um modo de falha pode ter baixa ocorrência, mas sua conseqüência pode ser grave. Este cenário propõe a avaliação da gravidade, independente da questão ocorrência.

Para garantir que o modo de falha ocorra dentro do período de oito horas, em um momento aleatório, foi definida que a freqüência de ocorrência do modo de falha é de uma vez a cada 480 minutos. Além disto, a probabilidade de ocorrência do modo de falha dentro das oito horas foi definida como uma distribuição uniforme.

A Tabela 6.9 resume as características do cenário 1.

Tabela 6.9 – Definição do cenário 1

Cenário 1	
Número de modos de falha (MF)	4
Ocorrência	Igual para todos os MF
Variável de resposta	Número de peças produzidas por uma máquina
Tempo simulado	8 horas
Número de dados gerados no experimento	160

A caracterização deste cenário na modelagem IDEF-SIM está representada na Figura 6.24.

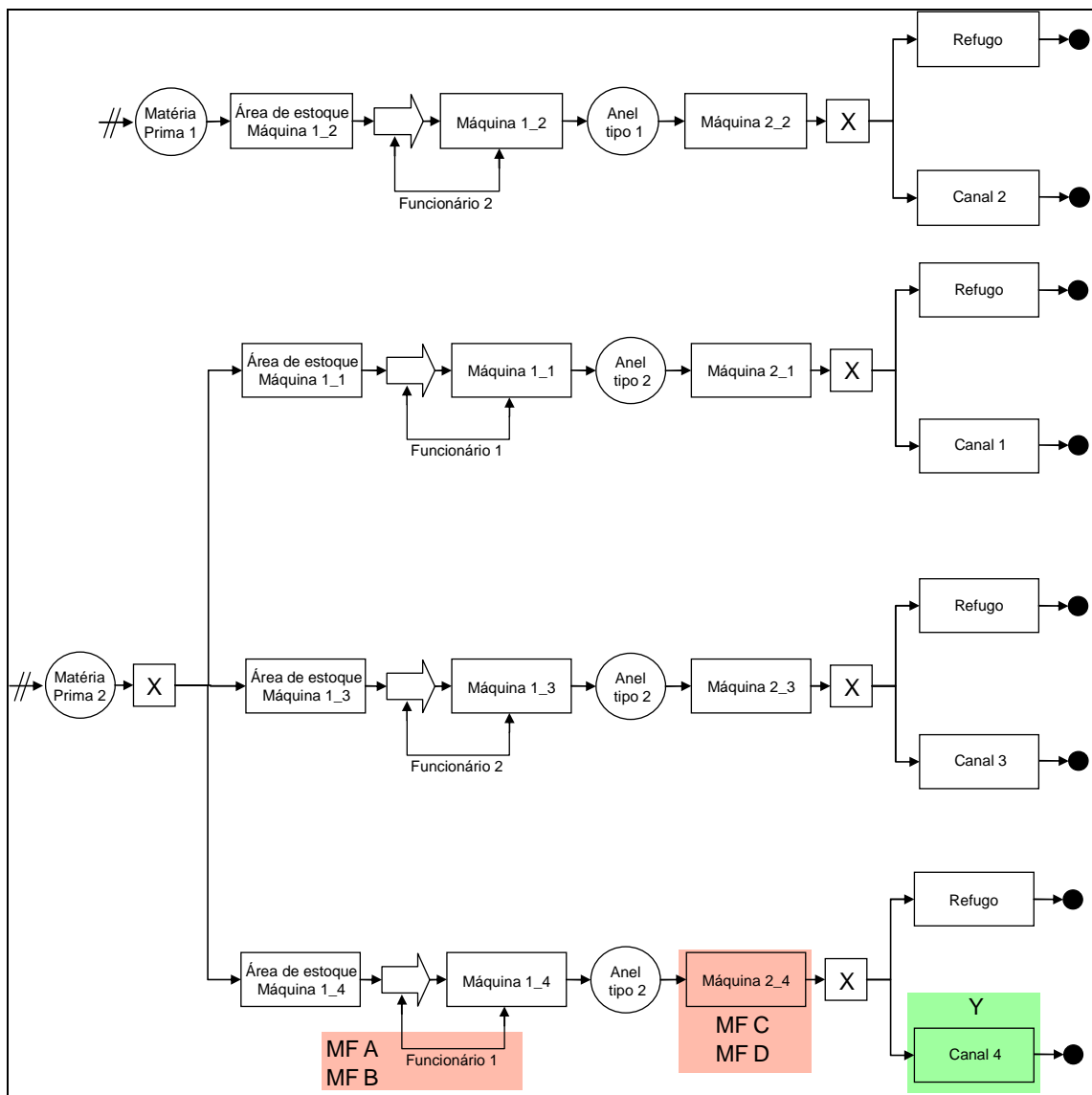


Figura 6.24 – Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 1 do primeiro objeto de estudo.

Para a confecção da matriz experimental, cada modo de falha foi considerado um fator, com dois níveis. No nível menos (-), o modo de falha não ocorre e o modelo permanece com o efeito do modo de falha desabilitado. No nível mais (+), o modo de falha ocorre e o efeito é ativado na programação. O detalhamento destes níveis é apresentado na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Níveis e fatores considerados no projeto experimental

Fator	Nível (-)	Nível (+)
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação do funcionário 1, uma vez em 8 horas. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de L(72,75; 49,94) min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	Paralisação do funcionário 1, uma vez em 8 horas. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de L(86,11; 74.06) min
C: (Modo de falha C)	Modo de falha não ocorre	Paralisação da máquina 2_4, uma vez em 8 horas. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de T(44; 70; 180) min
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	Paralisação da máquina 2_4, uma vez em 8 horas. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de N(60; 20)

Para a determinação dos efeitos dos fatores sobre a variável de resposta, foi utilizado o projeto experimental fatorial completo  $2^k$ . Este procedimento permite a determinação dos efeitos principais de todos os fatores bem como de todas as possíveis interações. Como o número de fatores é igual a quatro, têm-se 16 experimentos a serem realizados. Cada experimento foi replicado 10 vezes. Desta forma, este primeiro cenário gerou um total de 160 valores para a variável de resposta (número de peças produzidas pela máquina 2\_4), como mostra a Tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	Fator A	Fator B	Fator C	Fator D	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(+)	(-)	(-)	(-)	10500	10000	10000	11000	11500	11000	11000	11500	13000	11500	5,64
2	(+)	(-)	(-)	(-)	10000	10500	8500	9500	10500	10000	10500	9500	9000	9500	4,96
3	(-)	(+)	(-)	(-)	9500	10000	9500	9500	10000	9000	8500	9000	10500	9500	4,34
4	(+)	(+)	(-)	(-)	9500	8500	10500	10500	8500	10500	8500	8500	10500	9500	7,09
5	(-)	(-)	(+)	(-)	10000	8500	8500	10500	10000	8500	9000	9500	9500	8000	6,40
6	(+)	(-)	(+)	(-)	9000	8000	8500	8000	10000	8000	8500	8500	8000	8500	5,24
7	(-)	(+)	(+)	(-)	8500	9000	7000	7500	7000	9500	8500	9000	9000	8000	7,65
8	(+)	(+)	(+)	(-)	8000	9500	8500	10000	8000	9500	9500	10000	9500	9000	5,84
9	(-)	(-)	(-)	(+)	11000	11000	9000	12000	11500	10000	11000	11000	12000	11000	5,85
10	(+)	(-)	(-)	(+)	9500	10000	10500	9000	7500	7000	8500	8000	9500	8500	9,02
11	(-)	(+)	(-)	(+)	9500	8000	9500	10000	9500	8000	7500	10500	7500	9000	8,63
12	(+)	(+)	(-)	(+)	9000	8500	8000	11500	11000	9000	10500	8500	9000	10000	8,87
13	(-)	(-)	(+)	(+)	9500	8000	7500	7500	8500	10500	7500	9000	9000	10500	9,48
14	(+)	(-)	(+)	(+)	7500	9500	10500	8500	9500	10500	7500	8000	9500	7500	9,71
15	(-)	(+)	(+)	(+)	6500	7500	6500	6000	7000	5000	7500	8000	7500	6500	9,33
16	(+)	(+)	(+)	(+)	4500	3000	4000	3500	5000	4500	4000	5000	4500	5500	12,28

A Tabela 6.11 apresenta as quantidades de peças produzidas pela máquina em análise nos 16 experimentos, replicados 10 vezes cada (R1, R2, R3, ..., R10). No experimento (Exp) número 1, todos os modos de falha estão desativados, enquanto no experimento 16 todos os modos de falha estão ativados, o que justifica uma menor produção.

Conforme já apresentado no Capítulo 2 deste trabalho, o aumento da precisão  $h$  (redução do tamanho do intervalo) pode ser obtido através do aumento do número de replicações. Neste caso, a abordagem da precisão relativa corresponde à divisão do erro padrão dos dados pelo valor da média dos dados ( $h/\text{média}$ ). Chung (2004) afirma que o valor comumente utilizado para a precisão relativa é 0,10. Buscou-se, então, manter a precisão relativa o mais próximo possível de 10%. Neste caso, quanto menor o valor da precisão relativa, melhor. Durante a fase de experimentos, alguns valores de precisão relativa foram considerados muito altos. Nestes casos, novas replicações foram realizadas.

Antes da determinação dos efeitos dos fatores, algumas constatações devem ser feitas nos dados obtidos na Tabela 6.11. Conforme apresentado no Capítulo 4 deste trabalho, os resíduos encontrados nos experimentos realizados devem ter uma distribuição normal e serem independentes entre si (MONTGOMERY, 2005).

A Figura 6.25 mostra o teste de normalidade dos resíduos provenientes do cenário 1. O valor de  $p\text{-value}$  superior a 0,05 não rejeita a hipótese de normalidade.

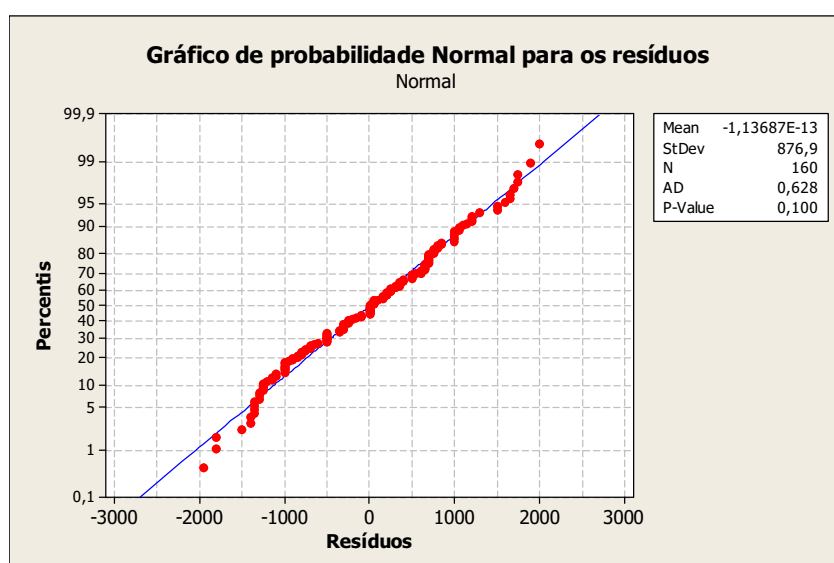


Figura 6.25 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 1, referente ao primeiro objeto de estudo.

A independência assumida dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.26. Em experimentos simulados esta constatação é esperada, uma vez que o simulador utiliza um gerador de números aleatórios. Na Figura 6.26, o resíduo é padronizado, e o eixo das ordenadas mostra a linha zero representando a média dos resíduos. Os valores para cima ou para baixo caracterizam o número de desvios.

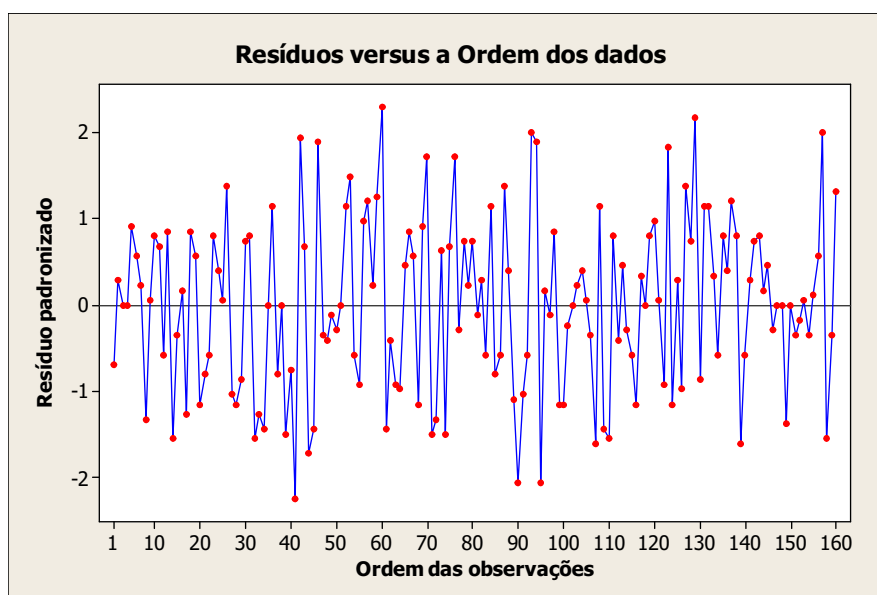


Figura 6.26 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 1, referente ao primeiro objeto de estudo.

Com estas confirmações, torna-se possível determinar o efeito de cada fator (no caso, modo de falha) sobre a variável de resposta (no caso, número de peças produzidas pela máquina 2\_4).

Neste cenário, somente é analisada a gravidade do efeito dos modos de falha, independente da sua ocorrência (uma vez que todos os modos de falha ocorreram uma vez durante o tempo simulado). Além disto, o cenário 1 foca a gravidade do efeito do modo de falha para uma máquina e não para o sistema (célula de produção) como um todo.

A preocupação em avaliar o efeito de forma individual para a máquina é justificável. Parte-se da idéia de que os modos de falha podem apresentar efeitos com níveis de gravidade diferentes, quando considerados atuando em um único ponto no

sistema, ou no sistema como um todo. Em outras palavras, o que é grave para uma máquina pode não ser grave para a produção como um todo.

A própria abordagem da FMEA não distingue se o efeito do modo de falha deve ser ponderado imaginando um efeito local ou global. Além disso, torna-se difícil para a equipe de especialistas, baseado em opiniões, definir se o efeito local ou global de um modo de falha é significativo ou não.

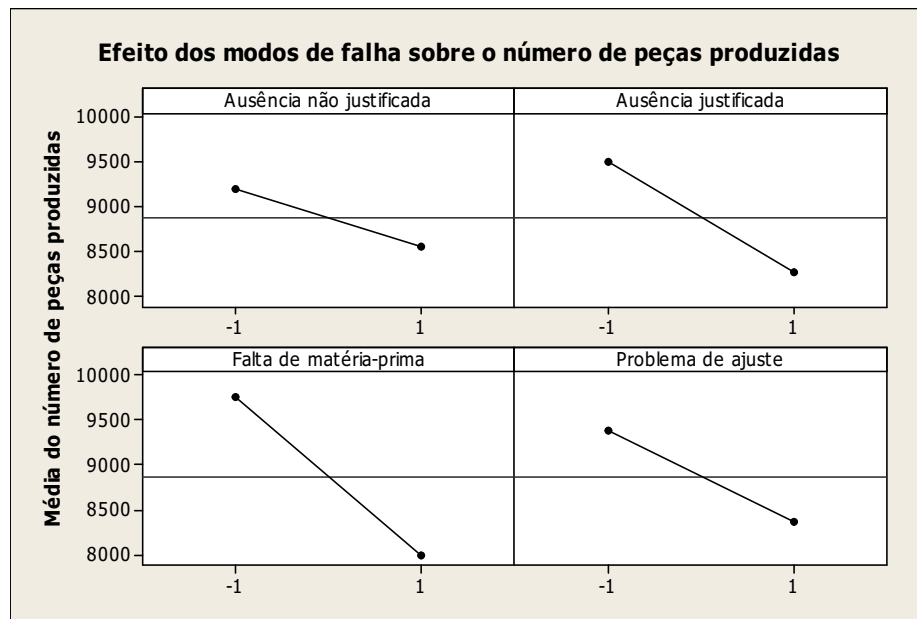


Figura 6.27 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pela máquina 2\_4.

A análise da Figura 6.27 permite concluir que todos os modos de falha, quando ocorrem (passando no nível -1 para o nível +1), diminuem o número de peças produzidas. Esta pode ser considerada uma conclusão óbvia, visto que se espera um efeito negativo na produção, proveniente dos modos de falha. O principal, nesta pesquisa, é ordenar estes modos de falha, destacando os de efeito mais impactante na produção, como mostra a Figura 6.28.

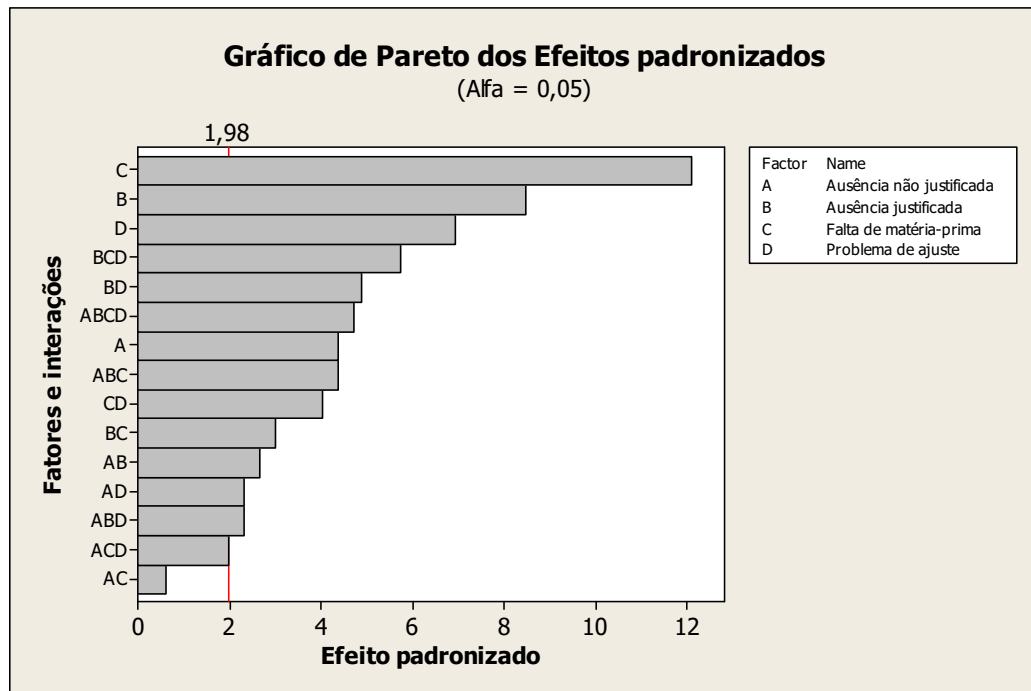


Figura 6.28 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela máquina 2\_4.

Desta forma, segundo a Figura 6.28, pode-se afirmar que o modo de falha C, falta de matéria-prima, gera o efeito local mais intenso sobre o número de peças produzidas. A linha vertical na figura mostra o limite no qual o efeito passa a ser estatisticamente significativo. Seguindo a ordenação gerada, têm-se os modos de falha B (ausência justificada do operador), seguido pelo modo de falha D (problema de ajuste na máquina).

As interações consideradas significativas na Figura 6.28 permitem concluir que, nestes casos, a somatória dos efeitos individuais dos modos de falha não retrata o efeito combinado destes modos de falha. Pode-se citar como exemplo a interação BD. A ocorrência conjunta dos modos de falha B e D gera um efeito sobre o número de peças produzidas mais intenso do que a consideração da soma dos efeitos de ambos, em momentos distintos.

A Figura 6.29 permite uma melhor visualização desta situação.

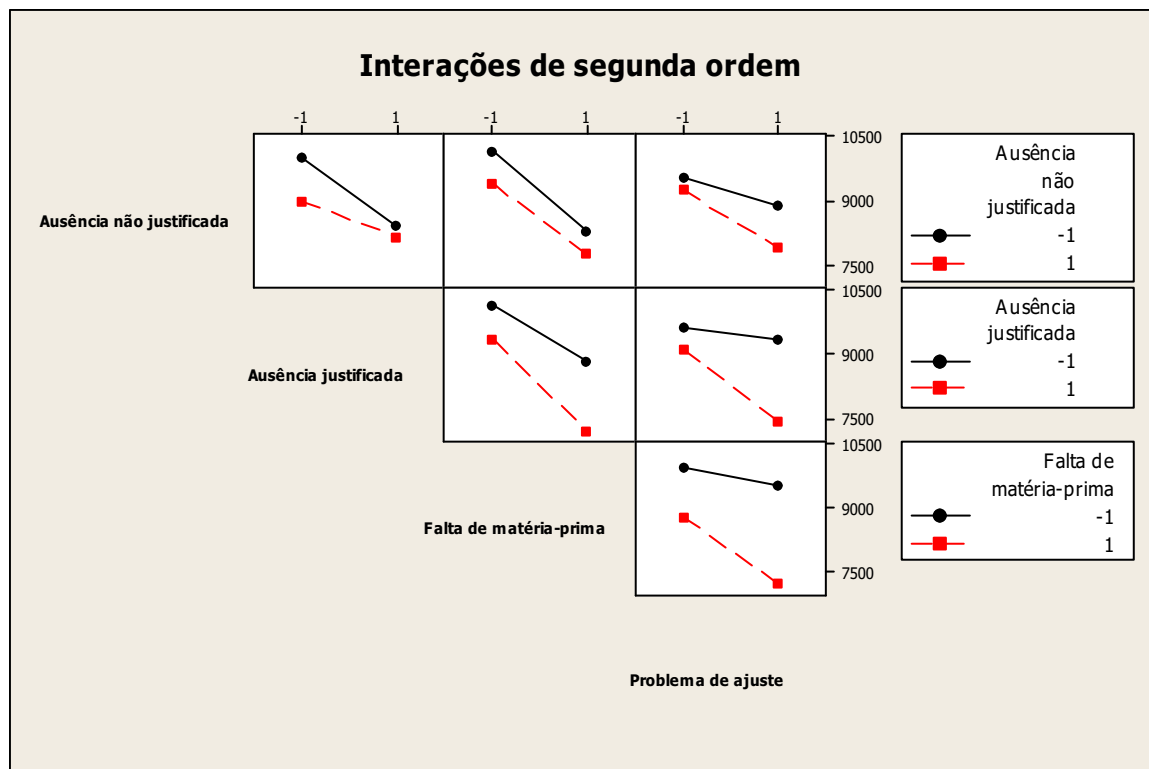


Figura 6.29 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela máquina 2\_4.

A interação entre os modos de falha B (ausência justificada) e D (problema de ajuste) pode ser analisada, na Figura 6.29, cruzando a linha “ausência justificada” com a coluna “problema de ajuste”. A linha tracejada caracteriza a situação onde o modo de falha B ocorre (nível +1). Esta linha é fortemente inclinada para baixo quando o modo de falha D também ocorre. Isto mostra que o efeito combinado destes dois modos de falha é prejudicial à produção.

Tal situação de interação já não ocorre quando se compara os modos de falha A (ausência não justificada) e C (falta de matéria-prima). A Figura 6.28 confirma esta não interação, posicionando este efeito de interação em último lugar. Neste caso, a avaliação de forma individual dos modos de falha A e C, nos casos de ocorrência conjunta, não acarreta erros significativos na análise dos efeitos.

O conhecimento por parte da empresa do efeito significativo da interação pode auxiliar no processo de tomada de decisões. Pode-se utilizar como exemplo a interação dos efeitos dos modos de falha B e D. Imaginando que o modo de falha B já esteja atuando, os especialistas do processo podem intensificar as ações de prevenção do modo de falha D, impedindo assim o efeito desta interação.

É lógico que, estando sob efeito de um modo de falha, naturalmente a equipe eleve sua atenção no intuito de impedir que qualquer outro modo de falha agrave ainda mais a situação. Porém, torna-se conhecido agora que alguns modos de falha possuem efeitos interativos ainda mais prejudiciais às metas de produção. Esta é uma das vantagens da ordenação criada.

Quando o cenário considera não somente uma, mas todas as máquinas e funcionários, a probabilidade de ocorrência de mais de um tipo de modo de falha aumenta, elevando a importância da análise de possíveis interações, como mostra o cenário a seguir.

### 6.3.9 Análise do cenário 2

No cenário 1 a questão da ocorrência do modo de falha não foi inserida na análise. Porém, modos de falha com baixa gravidade e alta ocorrência podem ser mais danosos a sistemas do que modos de falha com baixa ocorrência a alta gravidade. Desta forma, o cenário 2 simulado contemplou os fatores gravidade e ocorrência.

Para simular a ocorrência dos modos de falha, se fez uso do conceito de tempo médio entre falhas. Este tempo já foi apresentado na caracterização de cada um dos quatro modos de falha descritos neste primeiro objeto de estudo. A Tabela 6.12 apresenta estes valores.

Tabela 6.12 – Caracterização do fator ocorrência no cenário 2.

Modo de falha	TMEF (horas)	TMEF (dias)
A – Ausência não justificada do operador	73	3,04
B – Ausência justificada do operador	182	7,58
C – Falta de matéria prima	822	34,25
D – Problema de ajuste na máquina	9	0,37

Inicialmente, considerou-se um período simulado de 34,25 dias, que representa o maior valor de TMEF entre os quatro modos de falha . Nestes 34,25 dias, tem-se uma

ocorrência do modo de falha C. Por proporção, pode-se definir o número de ocorrências de cada modo de falha num período simulado de 34,25 dias.

Ao considerar um período de 34,25 dias, com o número de ocorrências de cada modo de falha proporcional ao seu TMEF, obtém-se uma ordenação da intensidade dos efeitos. Porém, estes efeitos podem se tornar estatisticamente insignificantes, comparados a produção total destes 34,25 dias. Outra desvantagem é que o tempo simulado torna-se maior.

Como o interesse da pesquisa é ordenar os modos de falha e suas interações, o valor absoluto do efeito do modo de falha não é o principal, mas sim seu valor para a ordenação.

Desta forma, o tempo simulado pode ser menor. Por exemplo: se o tempo simulado for reduzido em quatro vezes, a taxa de ocorrência de modos de falha deve ser aumentado em quatro vezes. Se dois modos de falha x e y têm tempo médio entre falhas respectivamente de 1 mês e 0,25 mês, e o tempo simulado for de 1 mês, o modelo deverá proporcionar 1 ocorrência do modo de falha x e 4 ocorrências do modo de falha y. Se para este mesmo caso o tempo simulado for reduzido para 0,25 mês, modelo deverá ainda proporcionar 1 ocorrência do modo de falha x e 4 ocorrências do modo de falha y, bastando para isso alterar os tempos médio entre falhas. Neste caso, mantém-se o valor relativo do efeito para ordenação. Denominou-se esta alteração do tempo médio entre falhas de “equalização das ocorrências”.

O tempo simulado foi de 5 dias, ao invés de 34,25 dias. Para a conversão dos TMEF, considerou-se que 34,25 dias equivalem a 5 dias. Desta forma, em 5 dias de simulação, tem-se apenas uma ocorrência do modo de falha C. Esta equalização objetiva conseguir uma ordenação de efeitos de modos de falha em um tempo menor de simulação. Os demais TMEF são então equalizados, segundo a referência estipulada acima. Têm-se assim as informações contidas na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Equalização das ocorrências

Modo de falha	TMEF real (h)	TMEF equalizado (h)	Ocorrências em 5 dias (equalizado)
A	73	10,65	11,26
B	182	26,56	4,51
C	822	120	1
D	9	1,31	91,60

A equalização das ocorrências pode ser aceita pois o objetivo principal é a comparação dos efeitos dos modos de falha, e não uma avaliação sobre seu valor absoluto. Assim, a análise dos resultados permitiu uma hierarquização dos modos de falha levando-se em consideração, além da gravidade do efeito, a ocorrência do modo de falha. Além disto, neste cenário, foi avaliado não o efeito local do modo de falha, mas sim o efeito global. Para atingir este objetivo, a variável de resposta “número de peças produzidas” foi posicionada após cada uma das quatro máquinas da célula, somando a produção total do primeiro objeto de estudo.

Os efeitos dos modos de falha foram programados nas quatro máquinas da célula, enquanto os modos de falha passaram a agir sobre os dois funcionários da célula.

A primeira ocorrência de cada modo de falha ocorre em um momento aleatório, segundo uma distribuição uniforme de probabilidade de ocorrência dentro do período. Entretanto, obrigatoriamente cada modo de falha ocorre segundo o número de ocorrências estipulado na Tabela 6.13. A Tabela 6.14 resume as características do cenário 2.

Tabela 6.14 - Definição do cenário 2

Cenário 2	
Número de modos de falha (MF)	4
Ocorrência	Proporcional ao TMEF
Variável de resposta	Número de peças produzidas pelas 4 máquinas
Tempo simulado	120 horas
Número de dados gerados no experimento	160

A representação deste cenário na modelagem em IDEF-SIM está na Figura 6.30.

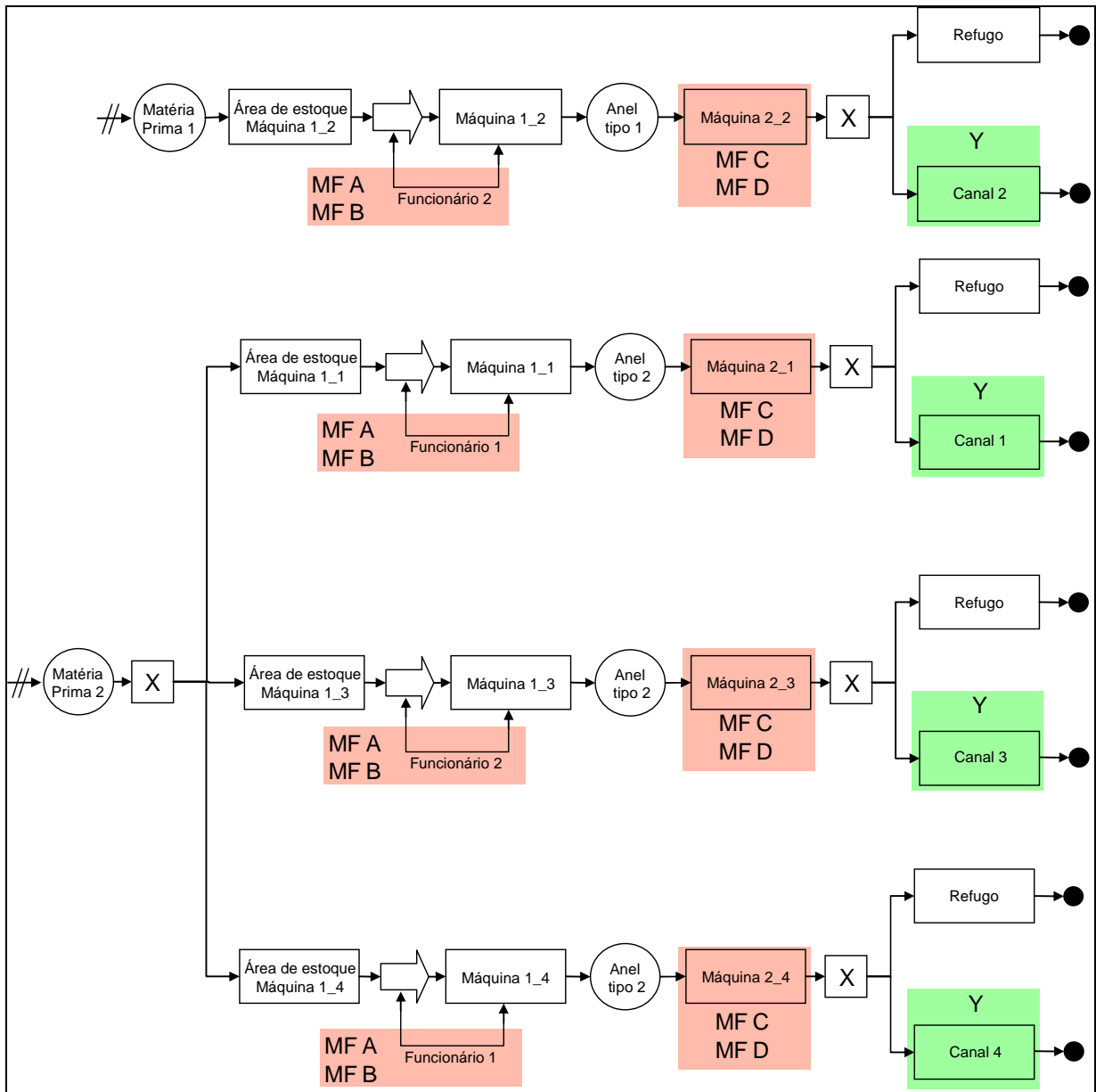


Figura 6.30 – Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 2 do primeiro objeto de estudo.

Assim como no caso do cenário 1, foi gerada uma matriz experimental com quatro fatores, gerando 16 experimentos, replicados 10 vezes cada um. As informações sobre os fatores e os níveis estão representadas na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental.

Fator	Nível -	Nível +
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação dos funcionários 1 e 2, 6 vezes cada um em 5 dias. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $L(72,75; 49,94)$ min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	Paralisação dos funcionários 1 e 2, 2 vezes cada um em 5 dias. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $L(86,11; 74,06)$ min
C: (Modo de falha C)	Modo de falha não ocorre	Paralisação da máquina 2_4, uma vez em 5 dias. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $T(44; 70; 180)$ min
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	Paralisação das máquinas 2_1, 2_2, 2_3 e 2_4, 23 vezes cada uma em 5 dias. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $N(60; 20)$

O número de ocorrências de cada modo de falha foi dividido igualmente entre as funções e recursos afetados. Isto se justifica porque na fase de coleta de dados sobre os modos de falha, estes foram coletados sem uma ligação direta com a máquina ou funcionário onde o modo de falha atuou.

Segundo a Tabela 6.15, o efeito do modo de falha C foi atribuído somente à máquina 2\_4. Isto se deve ao fato de que este modo de falha foi programado para ocorrer somente uma vez, seguindo a equalização do TMEF. Desta forma, aleatoriamente foi escolhida a máquina 2\_4.

O uso de uma mesma distribuição, em pontos diferentes da programação do modelo computacional, gera o mesmo valor em cada réplica. Por exemplo, se o tempo de paralisação de cada uma das 4 máquinas do primeiro objeto de estudo, devido ao modo de falha D, é uma normal com parâmetros  $N(60;20)$ , a cada réplica da simulação as 4 máquinas ficarão paralisadas o mesmo tempo. Para contornar este problema e garantir uma melhor aleatorização, utilizou-se um recurso do *software* Promodel® chamado de *streams*.

O chamado *stream* é o ciclo de uma seqüência pseudo-randômica de números independentes. Neste ciclo são gerados números aleatórios entre 0 e 1, para serem utilizados nas distribuições. O ponto de início deste ciclo é baseado em um valor

cedido pelo programador. Caso o programador não informe o ponto inicial do ciclo, o *software* adota a posição 1 do ciclo. Este ponto é também conhecido como semente.

O programador define opcionalmente este valor no momento da definição da distribuição. Assumindo o exemplo do modo de falha D, pode-se utilizar a distribuição  $N(60;20)$  em duas máquinas diferentes, utilizando as notações  $N(60;20;x)$  e  $N(60;20;y)$ , sendo  $x$  e  $y \in [1,100]$ . Com esta notação, embora as duas máquinas tenham um tempo de paralisação com média 60 minutos e desvio de 20 minutos, estas apresentarão tempos de paralisação diferentes, devido ao ponto de início no ciclo de números aleatórios.

Os 160 dados obtidos no experimento estão representados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	Fator A	Fator B	Fator C	Fator D	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(-)	(-)	(-)	(-)	634500	629500	654000	638000	645000	648500	643000	651500	646500	656500	0,958314
2	(+)	(-)	(-)	(-)	644000	617500	637500	652000	637500	624000	633500	631500	616000	608500	1,538803
3	(-)	(+)	(-)	(-)	650500	647000	630000	617500	652500	647500	646500	650500	645500	635500	1,245728
4	(+)	(+)	(-)	(-)	625500	611500	625000	608000	613500	625500	624500	643000	636000	633500	1,276365
5	(-)	(-)	(+)	(-)	626000	626000	626500	638500	645500	639500	641500	649500	652000	627000	1,142637
6	(+)	(-)	(+)	(-)	621000	607500	618500	602500	604000	616500	638500	618500	626000	616000	1,241986
7	(-)	(+)	(+)	(-)	648000	646000	641500	644000	658000	634000	649500	616000	627000	633000	1,374155
8	(+)	(+)	(+)	(-)	626000	614500	599000	626000	625500	624500	620000	626000	617500	629000	1,022935
9	(-)	(-)	(-)	(+)	607000	589000	552000	593000	610000	609000	592500	619500	607500	571500	2,467562
10	(+)	(-)	(-)	(+)	585500	592500	579500	622500	588000	615500	563500	589500	569500	582000	2,22328
11	(-)	(+)	(-)	(+)	608000	581000	596000	608500	590000	580000	591500	556000	566500	589500	2,242746
12	(+)	(+)	(-)	(+)	564000	565500	541500	554500	553500	591500	581500	579500	562000	544000	2,076684
13	(-)	(-)	(+)	(+)	600000	604500	577500	568000	585500	588500	582000	594000	606000	582000	1,491301
14	(+)	(-)	(+)	(+)	575000	597500	580000	582500	589000	560000	582500	584000	569500	585500	1,283414
15	(-)	(+)	(+)	(+)	591500	588500	592500	585000	580500	595500	577000	577000	599000	560500	1,390409
16	(+)	(+)	(+)	(+)	571500	576000	576500	574500	562500	569000	590500	583500	580500	580000	0,97334

Assim como no cenário 1, as verificações de normalidade dos resíduos e independência estão representadas nas Figuras 6.31 e 6.32.

A Figura 6.31 mostra o teste de normalidade dos resíduos provenientes do cenário 2. O valor de *p-value* superior a 0,05 não rejeita a hipótese de normalidade.

Da mesma forma que no cenário 1, a independência assumida dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.32. Com estas confirmações, torna-se possível determinar o efeito de cada modo de falha sobre o número de peças produzidas pelas quatro máquinas. A Figura 6.33 mostra estes efeitos principais.

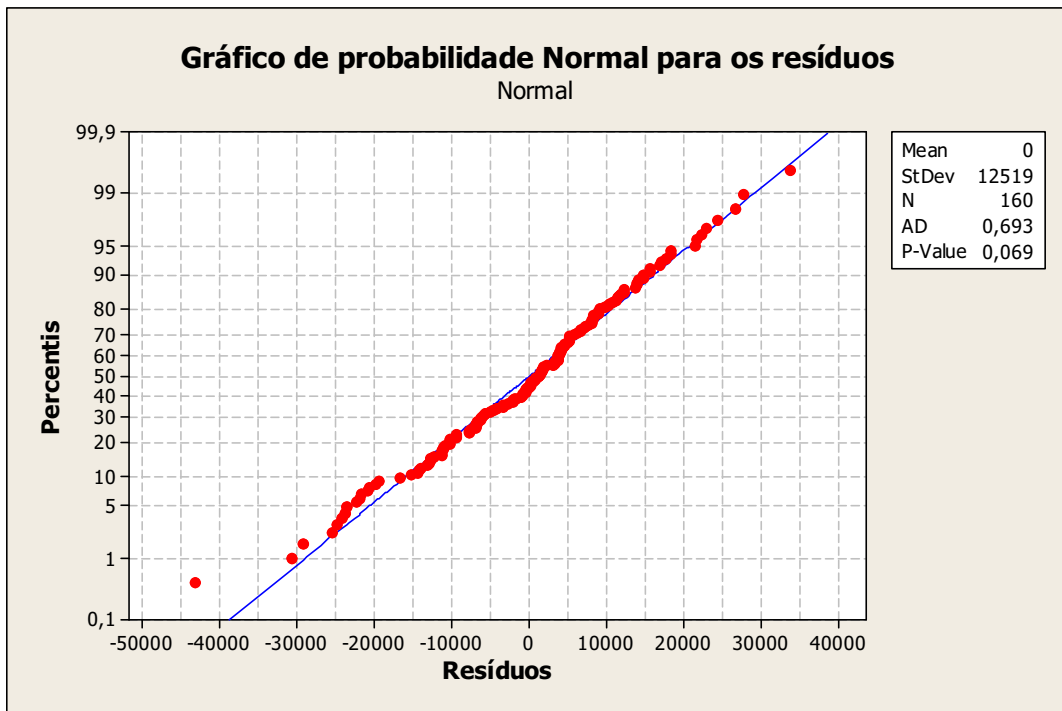


Figura 6.31 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 2, referente ao primeiro objeto de estudo.

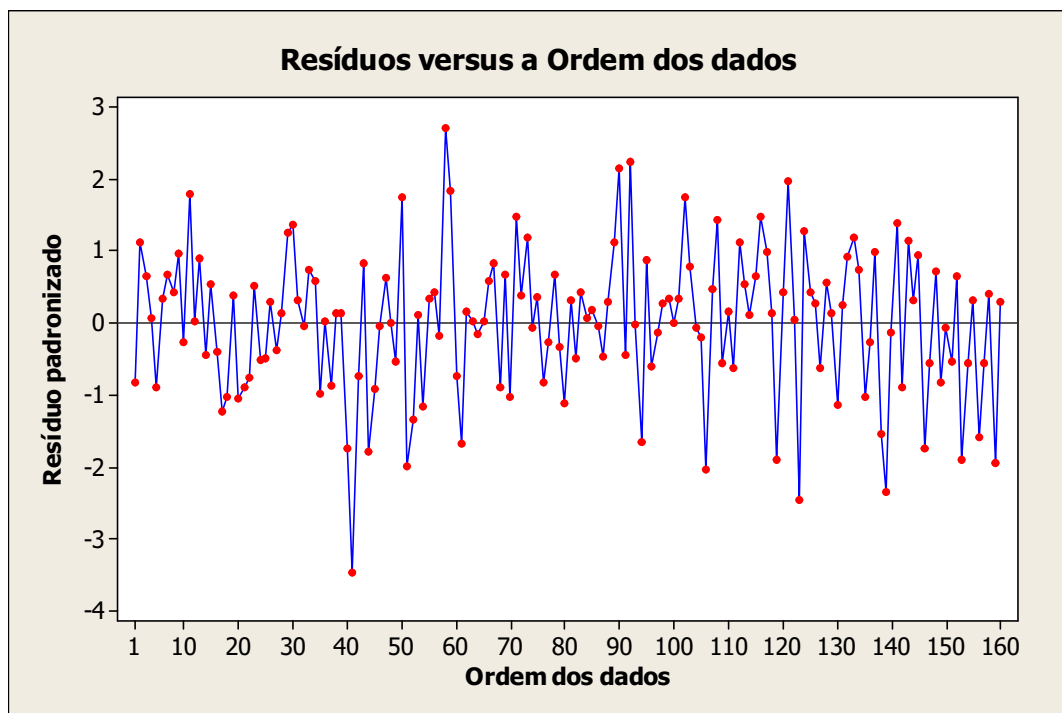


Figura 6.32 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 2, referente ao primeiro objeto de estudo.

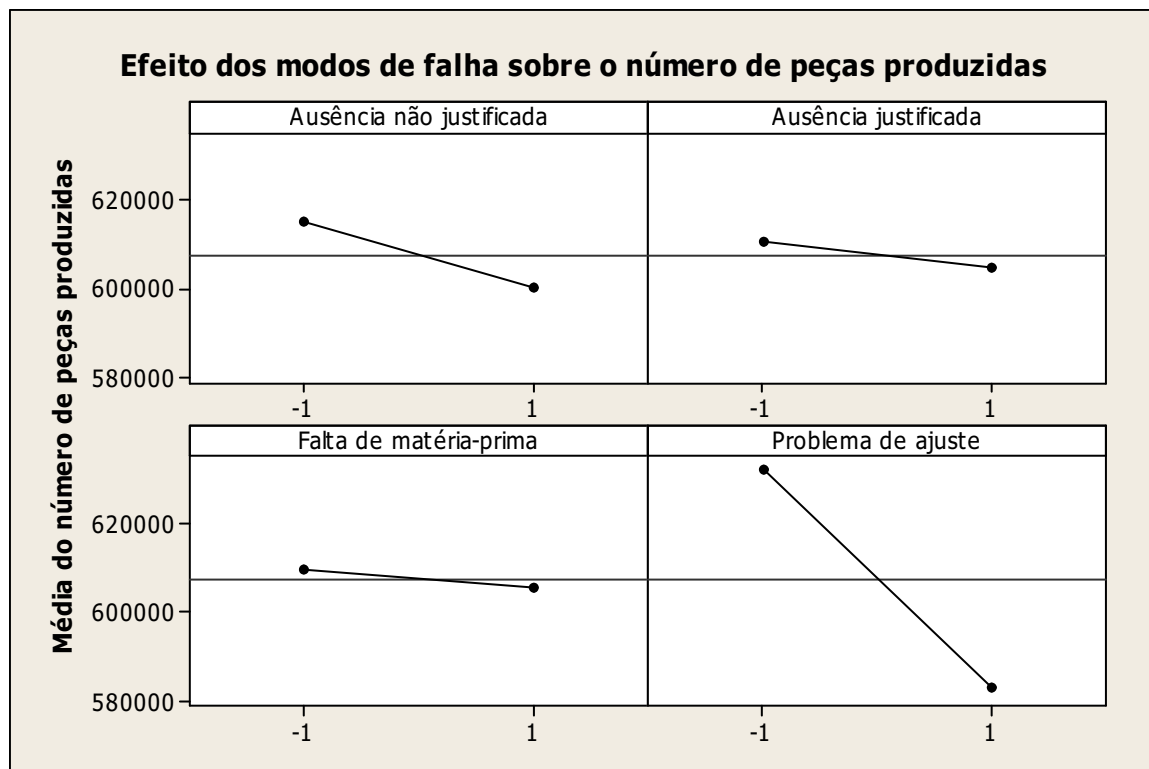


Figura 6.33 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pela célula.

A Figura 6.33 mostra que, como esperado, os efeitos principais dos modos de falha diminuem a produção da célula. Além disto, os modos de falha “ausência justificada” e “falta de matéria-prima” afetam menos a quantidade de peças produzidas pela célula, comparando-se aos outros modos de falha. Tal conclusão é reforçada pela Figura 6.34.

Observa-se agora que, devido ao fator ocorrência combinado com o fator gravidade, a hierarquização dos modos de falha se altera completamente. Considerando agora o efeito global do modo de falha na célula analisada, o modo de falha D (problema de ajuste na máquina) passa a ser indicado como o de maior efeito sobre o número de peças produzidas pela célula. Embora o modo de falha C tenha o maior efeito local na máquina, passa a ter o menor dos efeitos, quando analisado o efeito global na célula.

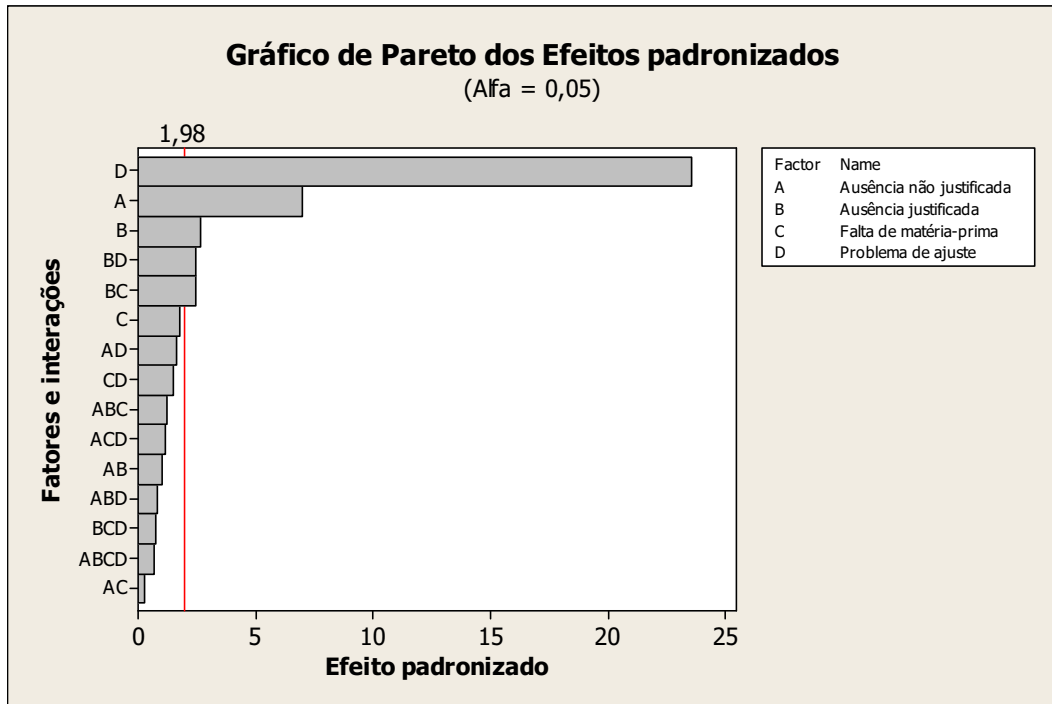


Figura 6.34 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela célula.

As interações dos efeitos dos modos de falha são menos significantes, comparados ao primeiro cenário analisado. A Figura 6.35 mostra as interações de segunda ordem.

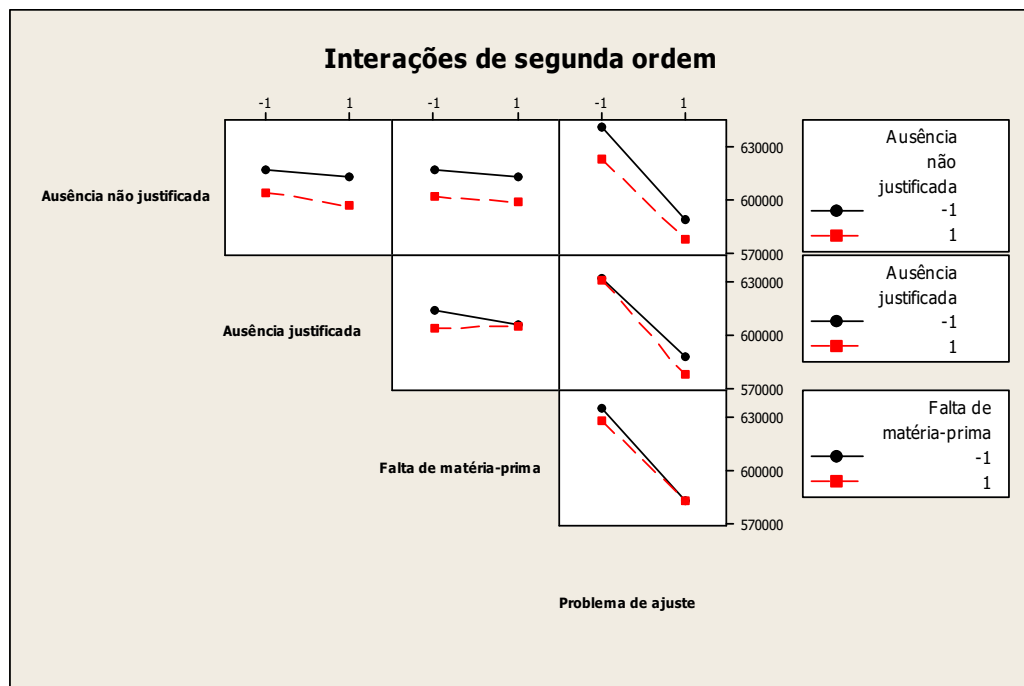


Figura 6.35 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela célula.

Um dos pontos interessantes da análise da Figura 6.35 é interação dos modos de falha B (ausência justificada) e C (falta de matéria-prima). A linha contínua, que caracteriza a não ocorrência do modo de falha B, mostra que o número de peças produzidas diminui com a ocorrência do modo de falha C. Porém, a linha tracejada, que caracteriza a ocorrência do modo de falha B, mostra que o total de peças produzidas não se altera significativamente com a ocorrência do modo de falha C. Ou seja, o efeito do modo de falha B anula o efeito do modo de falha C. Tal situação é fortemente influenciada pelas características deste cenário, onde o fator ocorrência é também considerado na simulação.

Os resultados obtidos neste cenário 2 são importantes aos gestores do processo, pois permitem uma visão mais real das necessidades de priorização de ações preventivas. É importante destacar que, dependendo do tempo escolhido de simulação, os valores absolutos dos efeitos irão se alterar. Porém, mantendo-se a equalização dos tempos médios entre falhas para cada modo de falha, as posições no *ranking* devem se manter.

A grande vantagem da diminuição do tempo de análise é a agilidade obtida na simulação. Uma vez que o objetivo do pesquisador é obter a hierarquização, e não o valor absoluto do efeito, esta estratégia torna-se eficiente e eficaz.

### **6.3.10 Síntese dos resultados do primeiro objeto de estudo**

A Figura 6.36 sintetiza os resultados encontrados nos dois cenários do primeiro objeto de estudo. Algumas constatações podem ser feitas, após análise dos cenários apresentados:

- a) Os efeitos locais e globais dos modos de falha não podem ser considerados iguais, devido sobretudo a questão da ocorrência. Conforme visto, embora o MF C tenha o maior efeito local sobre a máquina, esta posição se altera completamente quando considerado o efeito global. Devido a sua baixa ocorrência, a gravidade do MF C não é suficiente para mantê-lo no topo da ordenação dos efeitos globais (cenário 2).

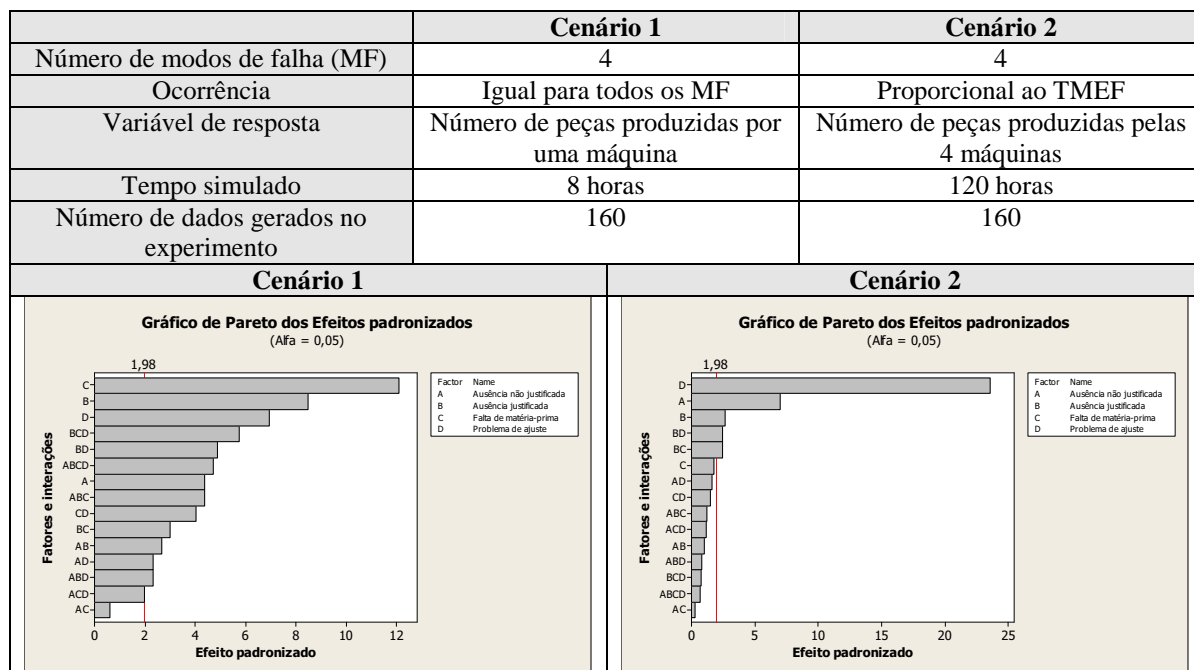


Figura 6.36 – Resumo dos resultados encontrados no primeiro objeto de estudo

b) Dificilmente especialistas do processo, contando com a experiência, ou mesmo com o uso de técnicas consagradas como a FMEA, poderiam analisar a interação dos efeitos dos modos de falha. Caso a empresa tenha registrado em bancos de dados o efeito dos modos de falha de forma individual, a soma destes efeitos não consegue representar na realidade a ação de múltiplas falhas, devido à parcela da interação. Já no caso dos modos de falha A e C, a soma individual dos efeitos destes modos de falha pode ser utilizado para estimar o efeito conjunto destes modos de falha, devido à pequena significância da interação.

#### 6.4 SEGUNDO OBJETO DE ESTUDO

A seguir serão apresentadas as etapas cumpridas e as conclusões obtidas para o segundo objeto de estudo deste trabalho. A estrutura deste item será a mesma seguida para o primeiro objeto de estudo.

### 6.4.1 Modelo conceitual

O segundo objeto de estudo é caracterizado por duas células de produção, com a mesma estrutura e produção em paralelo. Uma entidade de entrada foi considerada no modelo: a pirâmide de anéis. Ocorrem diversas conversões de entidades, diferentemente do primeiro objeto de estudo. Esta característica, além de outras apresentadas a seguir, caracteriza o modelo do segundo objeto de estudo com uma estrutura mais complexa, quando comparado ao primeiro objeto de estudo.

Quatro recursos foram utilizados neste modelo: os operadores de máquinas retificadoras das células 1 e 2, além dos operadores de máquinas lapidadoras das células 1 e 2. Estes funcionários são responsáveis pelos transportes e de algumas operações. O modelo referente ao segundo objeto de estudo, representado através da técnica IDEF-SIM, está presente nas Figuras 6.37, 6.38, 6.39, 6.40, 6.41 e 6.42.

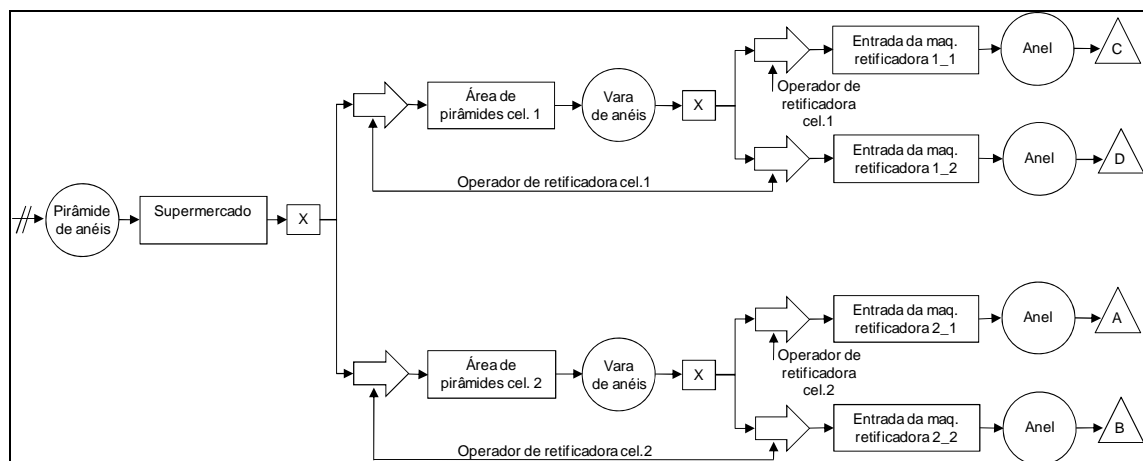


Figura 6.37 – Primeira parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

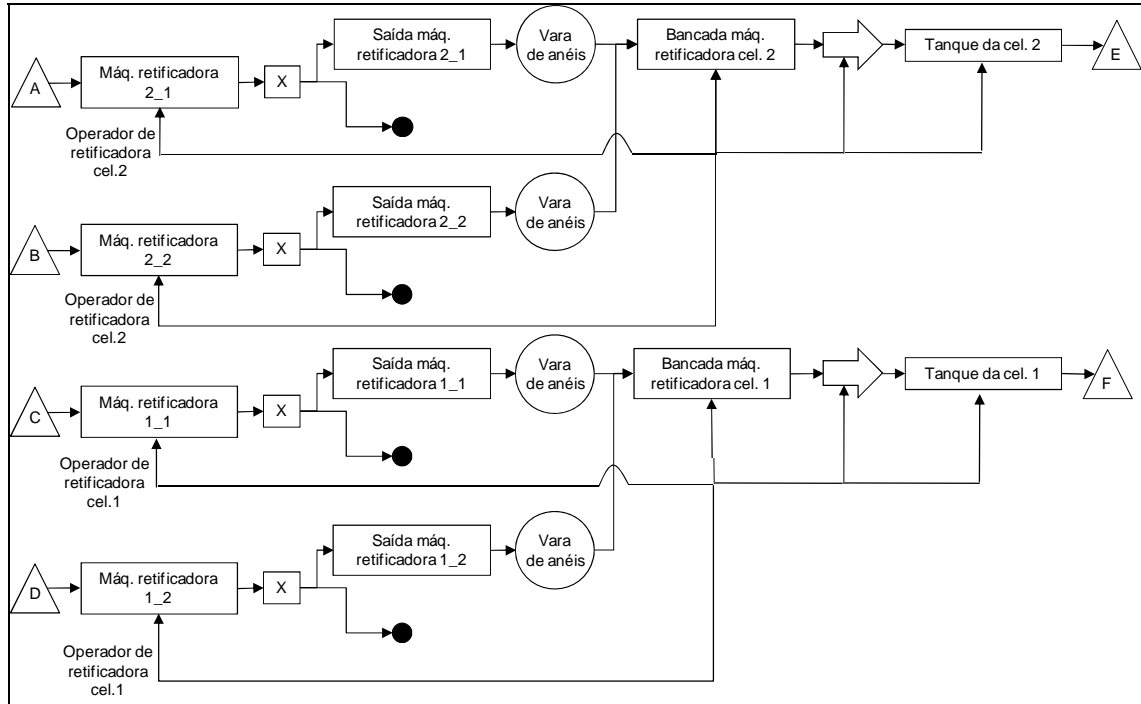


Figura 6.38 – Segunda parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

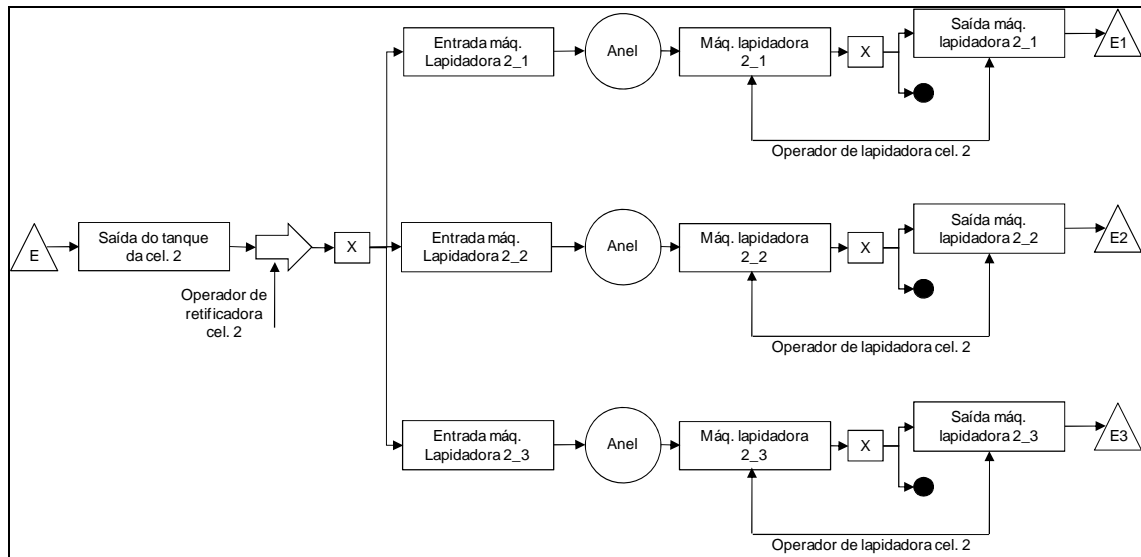


Figura 6.39 – Terceira parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

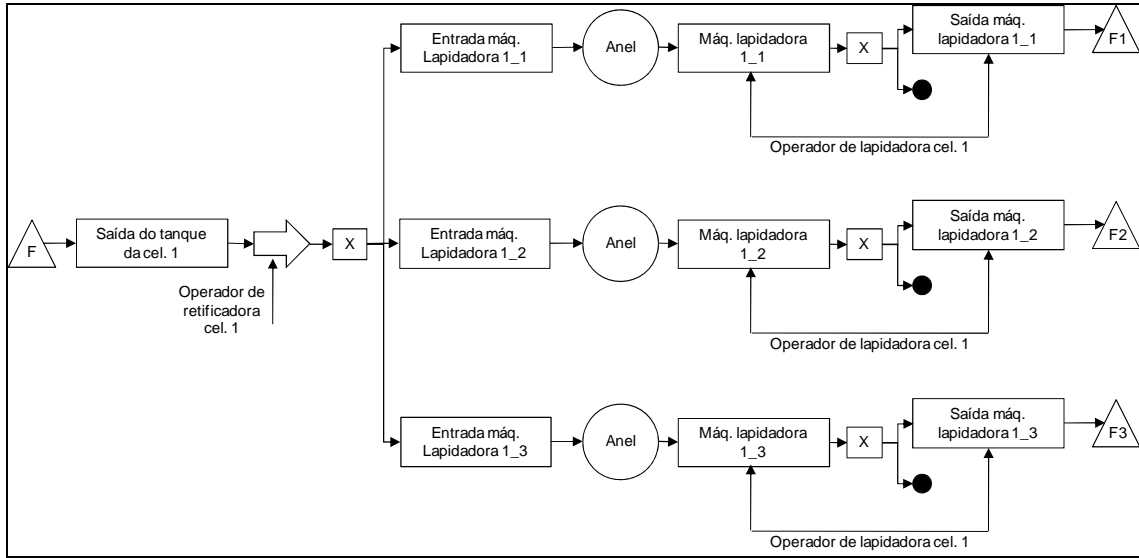


Figura 6.40 – Quarta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

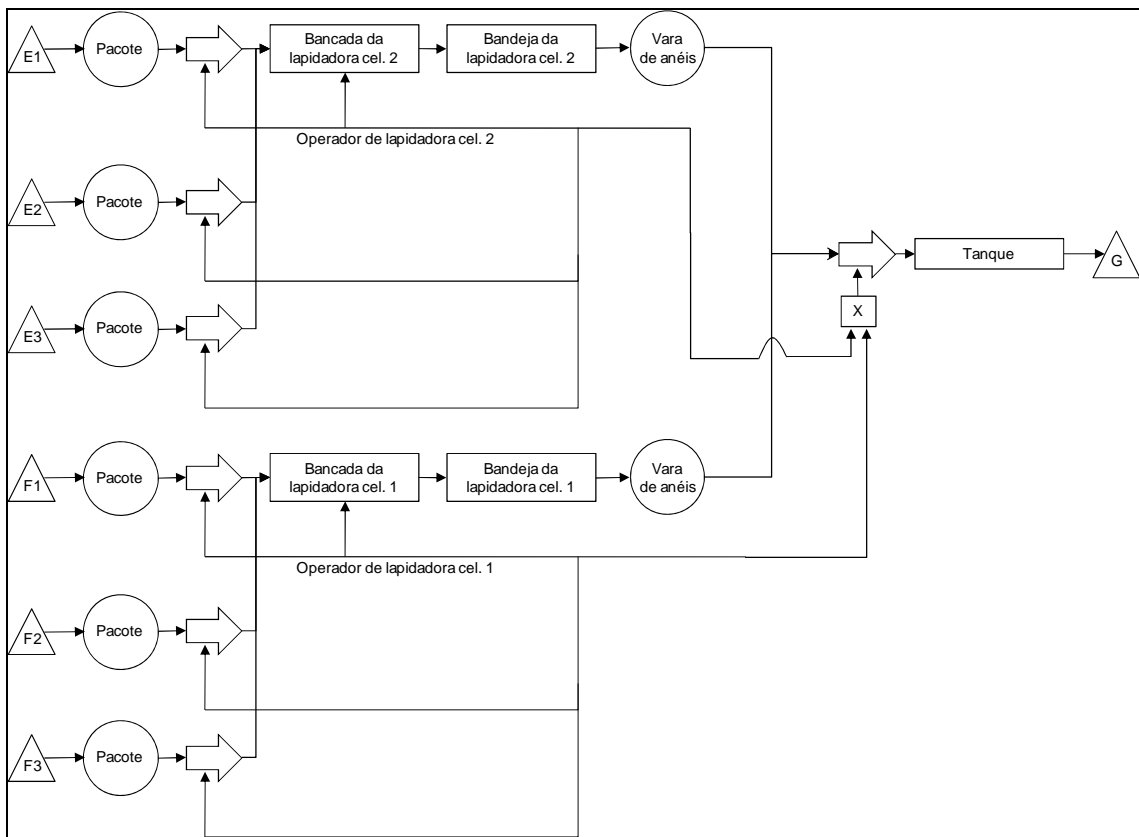


Figura 6.41 – Quinta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

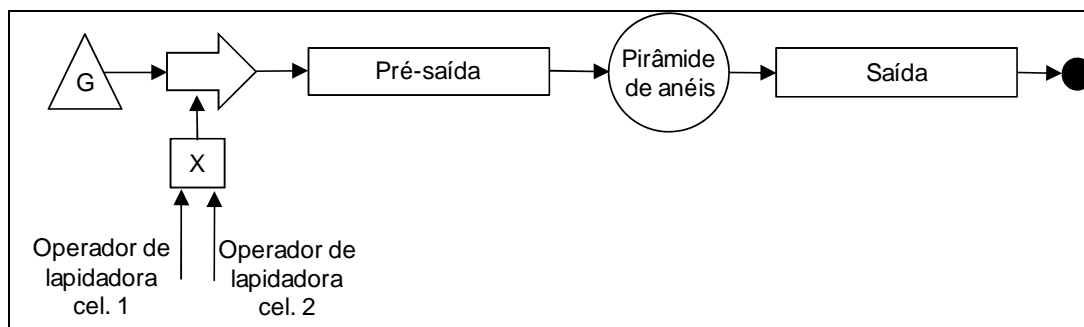


Figura 6.42 – Sexta parte do modelo em IDEF-SIM, referente ao segundo objeto de estudo.

Alguns pontos foram destacados neste modelo. Na Figura 6.37, os operadores de retificadoras são responsáveis por três transportes cada um. Isto indica que a ausência de algum destes operadores impede que o transporte seja realizado, paralisando assim as operações subsequentes.

Na Figura 6.38, os mesmos funcionários já citados agora possuem funções nos transportes e nas operações, aumentando assim suas participações no fluxo. Ainda nesta figura, pode-se perceber a presença de quatro pontos de finalização do modelo, correspondendo às peças rejeitadas que não avançam.

Nas Figuras 6.39 e 6.40 destacam-se a abertura do modelo em três rotas diferentes, contemplando as três máquinas lapidadoras de cada célula.

Na Figura 6.41 destaca-se que o transporte realizado para o posto de trabalho chamado de “tanque” pode ser feito pelo operador de lapidadora da célula 1 ou pelo operador de lapidadora da célula 2. Desta forma, a programação computacional deve permitir que a paralisação de um destes funcionários não impeça este referido transporte. A mesma situação é observada na Figura 6.42, onde o modelo é encerrado.

#### **6.4.2 Modelagem dos dados de entrada, implementação, verificação e validação do modelo computacional**

Para efeito de simplificação, os passos apresentados neste item serão resumidos, uma vez que seguiram a mesma sistemática apresentada no primeiro objeto de estudo.

O modelo computacional final foi obtido após 24 versões e está representado na Figura 6.43.

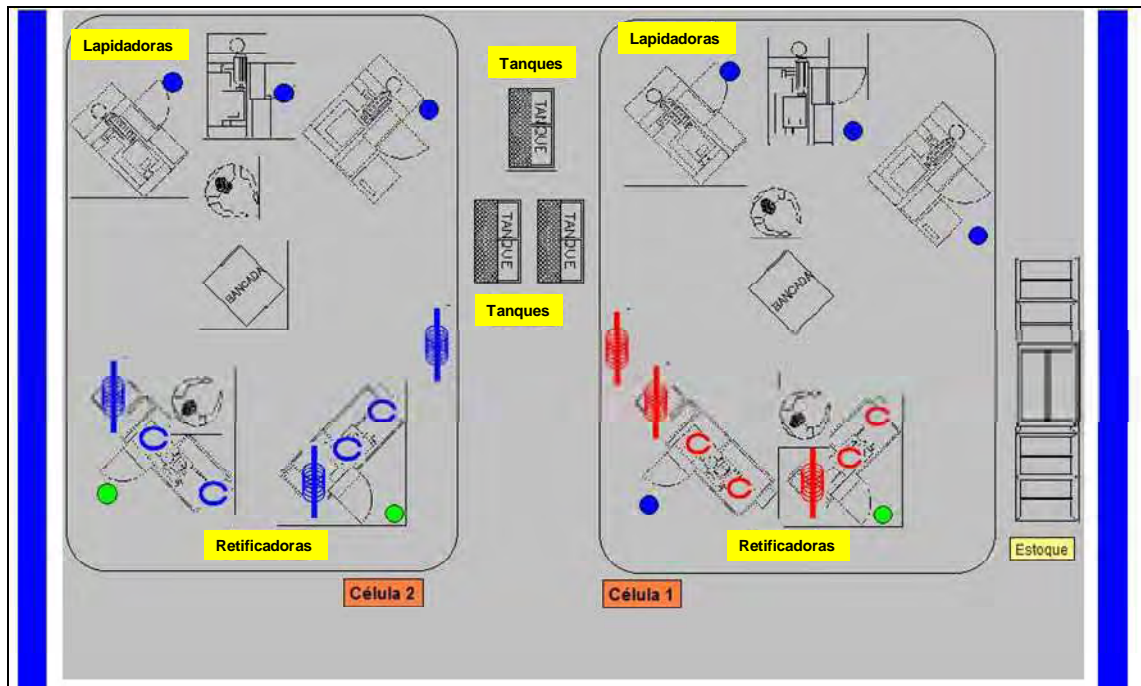


Figura 6.43 – Modelo computacional do segundo objeto de estudo, através do *software* Promodel®.

A validação estatística do modelo seguiu o mesmo esquema apresentado no fluxograma da Figura 6.8. A diferença encontrada neste caso foi que, diferentemente do primeiro objeto de estudo, a hipótese de normalidade não foi aceita para os conjuntos de dados reais e simulados. Utilizou-se então o teste não-paramétrico de Mann-Whitney, como mostra a Figura 6.44.

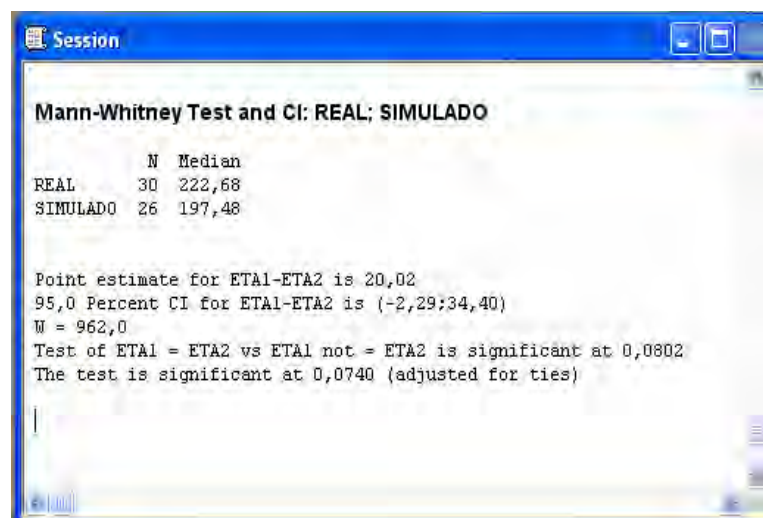


Figura 6.44 – Teste de Mann-Whitney realizado através do *software* Minitab®.

Como a estatística de teste de Mann-Whitney (0,0740) é maior que o nível de significância adotada (0,05) o modelo está validado estatisticamente para a variável de saída “total de unidades produzidas por dia”. Além da validação estatística foi realizada a validação face-a-face por especialistas.

### 6.4.3 Modelagem dos modos de falha

Da mesma forma que no primeiro objeto de estudo, os dados referentes às falhas neste objeto foram obtidos através de duas formas: entrevistas com especialistas e consulta a banco de dados.

Os dados referentes aos modos de falha do segundo objeto de estudo compreendem um período de tempo de análise de 49 dias, ou 1176 horas, sendo de agosto a setembro de 2007, considerando três turnos de trabalho diários. Quatro modos de falha foram identificados neste período, como demonstrado a seguir. Vale destacar que os dados que caracterizam os modos de falha foram retirados do sistema, considerando as duas células, sem haver uma distinção entre elas.

#### a) Modo de falha A: Ausência do operador

Este modo de falha caracteriza-se pela situação onde o funcionário da célula não está no posto de trabalho. Fica assim caracterizado o efeito deste modo de falha: paralisação do funcionário, por um determinado tempo.

Através de uma consulta ao banco de dados da empresa, foram observadas 26 ocorrências deste modo de falha, distribuídas entre os três turnos da empresa. Os dados registrados referem-se ao tempo em que o funcionário permaneceu ausente do posto de trabalho. Utilizando o *software* Minitab, analisou-se a necessidade de eliminação de algum valor considerado *outlier*. Um valor foi eliminado.

Através do número total de horas consideradas no período e o número de ocorrências deste modo de falha, determinou-se o tempo médio entre falhas (TMEF), como resume a Tabela 6.17.

Tabela 6.17 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha A.

<b>Total de horas</b>	<b>1176</b>
<b>Número de ocorrências</b>	<b>25</b>
<b>TMEF (h)</b>	<b>47,04</b>

Novamente, o *software* Minitab foi utilizado para a verificação da normalidade dos dados coletados. Caso o teste confirme a normalidade, os dados poderão ser bem representados por uma distribuição normal. A Figura 6.45 demonstra este teste de normalidade.

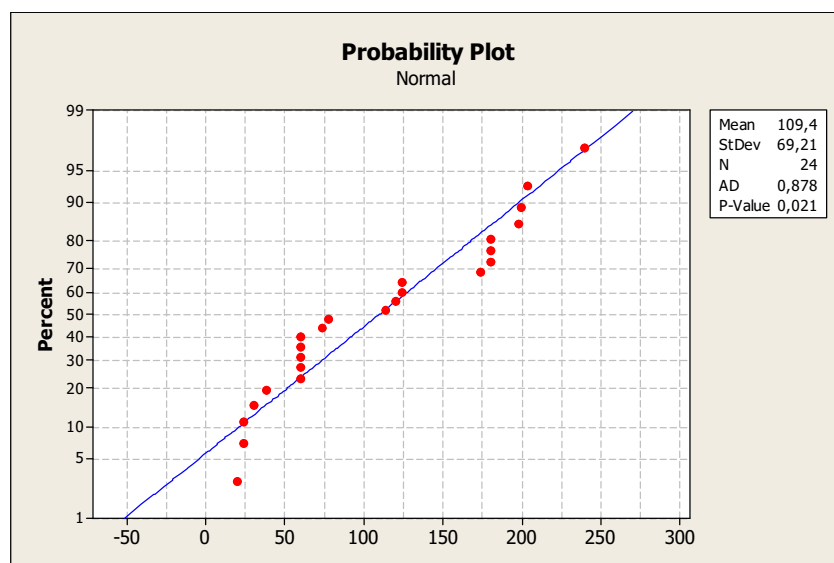


Figura 6.45 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Ausência do operador”

O valor do *p-value* indica a rejeição da hipótese de normalidade, o que indica a necessidade de outra distribuição para a representação dos dados. A Figura 6.46 mostra a análise realizada pelo Stat:Fit, apontando a distribuição Beta para este conjunto de dados.

Beta		
minimum	=	20. [fixed]
maximum	=	240.
p	=	0.899143
q	=	1.40344
Chi Squared		
total classes		4
interval type		equal probable
net bins		4
chi**2		1.67
degrees of freedom		3
alpha		5.e-002
chi**2[3,5.e-002]		7.81
p-value		0.644
result		DO NOT REJECT
Kolmogorov-Smirnov		
data points		24
ks stat		0.168
alpha		5.e-002
ks stat[24,5.e-002]		0.269
p-value		0.457
result		DO NOT REJECT
Anderson-Darling		
data points		22
ad stat		0.524
alpha		5.e-002
ad stat[5.e-002]		2.49
p-value		0.723
result		DO NOT REJECT

Figura 6.46 – Não rejeição da distribuição beta para representação dos dados da “Ausência do operador”, segundo o Stat:Fit.

#### b) Modo de falha B: Refugo

Este modo de falha caracteriza a porcentagem de peças que são eliminadas do sistema, por problemas de qualidade. Ou seja, a partir de determinado momento, certa porcentagem de peças muda de rota e não é contabilizada no número de peças produzidas.

Este registro é feito no sistema de informação da empresa apenas no final do turno de trabalho. Portanto, o número de ocorrências representa o número de turnos de trabalho com registro de refugos.

Este modo de falha será dividido em 2 modos de falha: refugo na máquina retificadora e refugo na máquina lapidadora. Isto deve a diferenças encontradas quando considerado o tipo de máquina. Porém, não se considerou diferenças entre as máquinas do mesmo tipo. Procurou-se uma porcentagem média para representar estes modos de falha.

Através do número total de horas consideradas no período e o número de ocorrências deste modo de falha, determinou-se o tempo médio entre falhas (TMEF), como resume as Tabelas 6.18 e 6.19.

Tabela 6.18 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B (máquina retificadora).

<b>Total de horas</b>	1176
<b>Número de ocorrências</b>	81
<b>TMEF (h)</b>	14,5

Tabela 6.19 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha B (máquina lapidadora).

<b>Total de horas</b>	1176
<b>Número de ocorrências</b>	100
<b>TMEF (h)</b>	11,76

Analisando os dados referentes ao refugo, chegou-se a conclusão que para as retificadoras, a porcentagem de refugo é de 0,494%; e para as lapidadoras é de 0,685%. Ou seja, nos turnos onde for programado o refugo, as porcentagens indicam a quantidade de peças que será desviada do fluxo de produção.

É lógico que trabalhar com uma variável expressa em porcentagens implica diretamente no reconhecimento do total produzido naquela ocasião. Como os dados encontrados no sistema da empresa apontavam para porcentagens com pequena variação (de uma ocorrência a outra do modo de falha), adotou-se um valor determinístico.

### c) Modo de falha C: Quebra de máquina

Este modo de falha caracteriza-se pela interrupção do funcionamento da máquina, exigindo manutenção corretiva. O efeito é o tempo de paralisação da máquina, já considerando o tempo de reparo.

Nos dados analisados, este modo de falha ocorreu apenas nas retificadoras. Não foram consideradas diferenças de efeito entre as máquinas retificadoras.

Durante o período analisado, nove ocorrências foram constatadas, como mostra a Tabela 6.20. Não foram constatados *outliers*.

Tabela 6.20 - Tempo médio entre falhas para o modo de falha C.

<b>Total de horas</b>	1176
<b>Número de ocorrências</b>	9
<b>TMEF (h)</b>	130,67

O teste de normalidade realizado não rejeitou a hipótese de normalidade, apresentando um *p-value* maior que 0,05, como mostra a Figura 6.47. Esta aceitação foi fortemente influenciada pelo pequeno número de dados observados. Desta forma, este modo de falha teve seu efeito representado por uma distribuição normal.

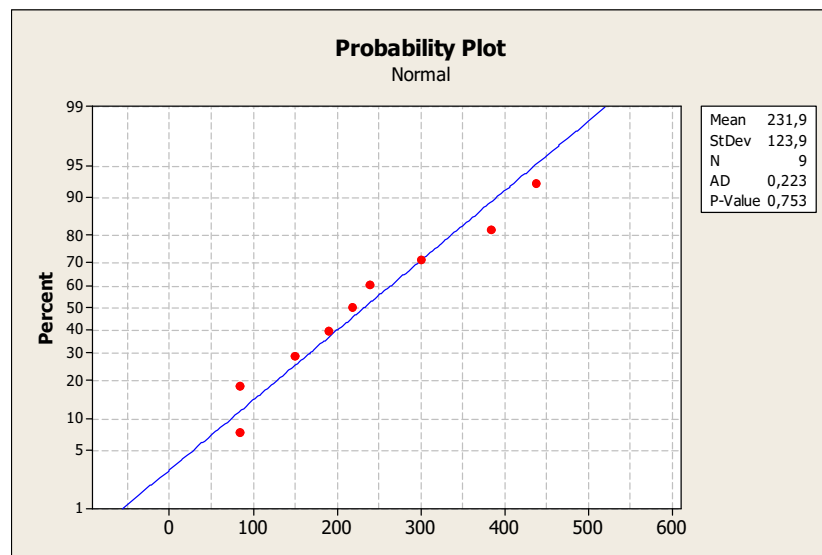


Figura 6.47 – Teste de normalidade (Anderson-Darling) para os dados referentes ao modo de falha “Quebra de máquina”.

#### d) Modo de falha D: Retrabalho

Este modo de falha representa problemas de qualidade encontrados nas peças, porém ainda com a possibilidade de recuperação. Uma vez constatada a necessidade de retrabalho, a peça é reenviada ao fluxo para os ajustes necessários.

Como no banco de dados analisados não há informações sobre os ajustes realizados no retrabalho, as peças sujeitas ao retrabalho foram modeladas da mesma forma que observado no modo de falha refugo. Ou seja, a partir de determinado momento, certa porcentagem de peças muda de rota e não é contabilizada no número de peças produzidas. Este registro é feito no sistema de informação da empresa apenas no final do turno de trabalho. Portanto, o número de ocorrências representa o número de turnos de trabalho com registro de retrabalho.

Mas por que houve a necessidade de diferenciar refugo e retrabalho, já que em ambos os casos as peças são eliminadas do sistema (no modelo simulado)? É

importante a diferenciação para uma possível tomada de ação gerencial. Em uma possível avaliação econômica, o modo de falha refugio pode representar um custo maior à empresa, comparado ao modo de falha retrabalho. Porém, este tipo de análise não é objetivo deste trabalho.

Este modo de falha foi dividido em dois modos de falha: retrabalho na máquina retificadora e retrabalho na máquina lapidadora. Isto se deve a diferenças encontradas quando considerado o tipo de máquina. Porém, não se considerou diferenças entre as máquinas do mesmo tipo. Procurou-se uma porcentagem média para representar estes modos de falha.

Através do número total de horas consideradas no período e o número de ocorrências deste modo de falha, determinou-se o tempo médio entre falhas (TMEF), como resume as Tabelas 6.21 e 6.22.

Tabela 6.21 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha D (máquina retificadora).

<b>Total de horas</b>	1176
<b>Número de ocorrências</b>	7
<b>TMEF (h)</b>	168

Tabela 6.22 – Tempo médio entre falhas para o modo de falha D (máquina lapidadora).

<b>Total de horas</b>	1176
<b>Número de ocorrências</b>	52
<b>TMEF (h)</b>	22,61

Analisando os dados referentes ao retrabalho, chegou-se a conclusão que para as retificadoras, a porcentagem de retrabalho é de 23,33%; e para as lapidadoras é de 15,06%. As justificativas para a forma de escolha destes valores são as mesmas apresentadas anteriormente para o modo de falha refugio.

#### 6.4.4 Programação dos efeitos dos modos de falha

Uma vez definidos os modos de falha e modelados estatisticamente, parte-se para a modelagem computacional destes modos de falha sobre o modelo computacional do segundo objeto de estudo. A representação dos modos de falha na modelagem

conceitual em IDEF-SIM foi feita dentro das características de cada cenário, devido à maior complexidade deste modelo, comparado ao primeiro.

A Figura 6.48 representa uma visão geral das associações realizadas no modelo.

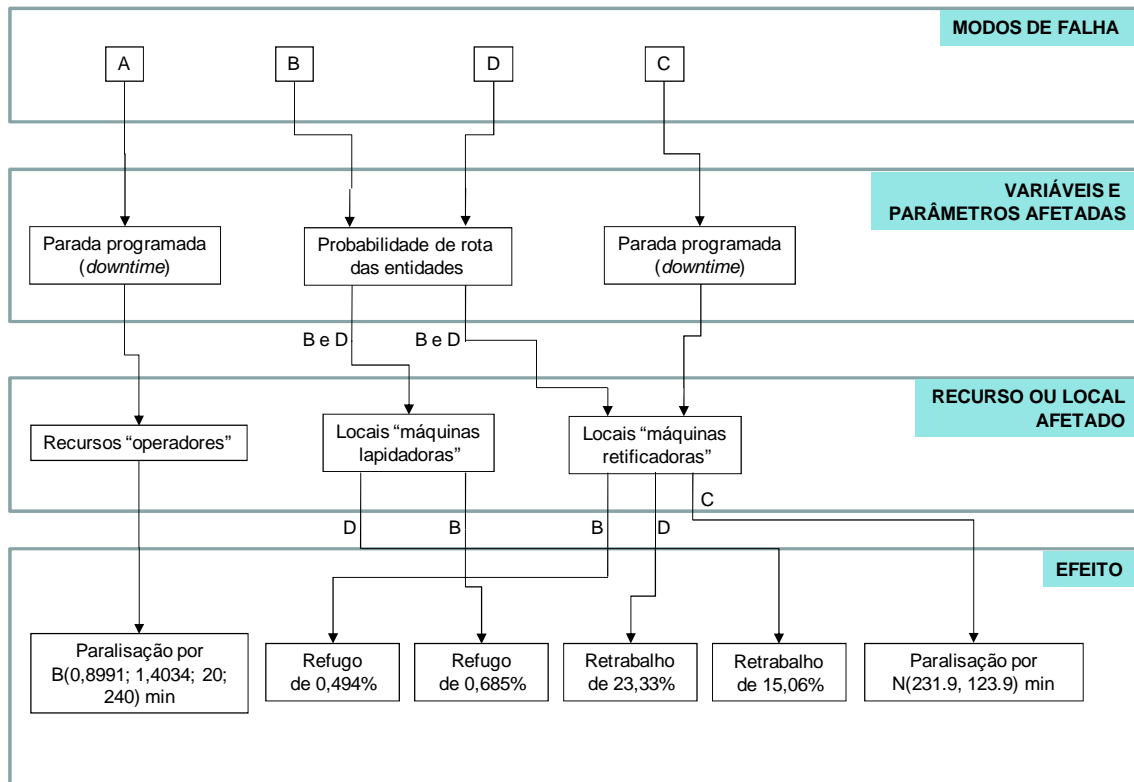


Figura 6.48 – Ação dos modos de falha sobre o modelo de simulação do segundo objeto de estudo.

Cada um dos efeitos foi verificado no modelo através do comando “DISPLAY”, da mesma forma que foi salientado no objeto de estudo 1. Cada um dos efeitos listados na Figura 6.48 permaneceu programado no modelo computacional, sendo ativado e desativado no momento desejado. Um dos artifícios utilizados neste objeto de estudo foi o uso do sinalizador /\* e \*/. Estes sinalizadores desabilitam comandos utilizados na programação. Um exemplo deste uso está nas rotas geradas. Quando o experimento não contemplou o modo de falha refugo ou retrabalho, por exemplo, o comando que direciona a peça para fora do fluxo pode ser desativado utilizando estes sinalizadores.

### 6.4.5 Análise do cenário 1

Este cenário apresenta o segundo objeto de estudo, com os efeitos dos modos de falha programados e com um tempo simulado de 8 horas. Este cenário avalia o efeito local dos modos de falha, através da medição do número de peças produzidas por uma lapidadora. Neste cenário, os modos de falha ocorreram uma vez, afetando sempre o mesmo local e o mesmo recurso, sendo o horário de ocorrência deste modo de falha com probabilidade uniforme durante as 8 horas. Considerou-se, assim, apenas uma célula de produção.

Desta forma, não se levou em consideração o fator ocorrência, mas sim o fator gravidade do modo de falha. A Figura 6.49 mostra o ponto de programação dos efeitos dos modos de falha do cenário 1.

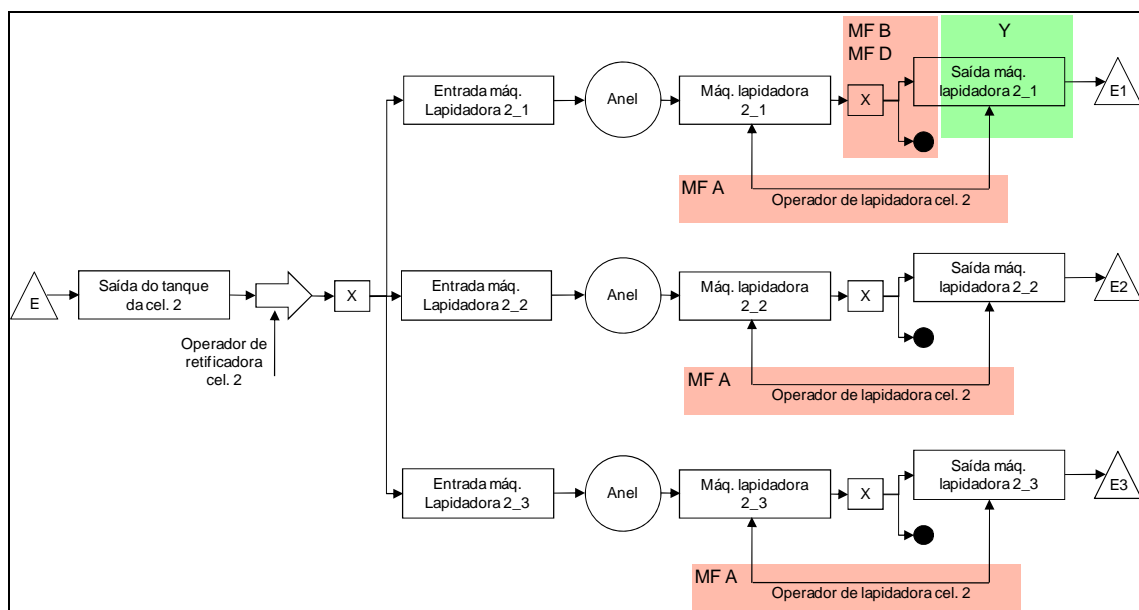


Figura 6.49 - Programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 1 do segundo objeto de estudo.

A Figura 6.49 mostra que o efeito do modo de falha A (MF A) foi programado sobre o recurso operador de lapidadora da célula 2, enquanto os modos de falha B e D (refugo e retrabalho, respectivamente), foram programados na porcentagem de peças que deixam o fluxo, e não seguem para a saída da máquina lapidadora 2\_1, onde foi

posicionada a variável de resposta Y. Embora o operador deixe de atuar nas três lapidadoras, apenas na primeira será contabilizado o efeito.

Pode-se notar que este cenário não contempla o modo de falha C, por este afetar apenas a retificadora. A Tabela 6.23 resume as características deste cenário 1.

Tabela 6.23 - Definição do cenário 1.

Cenário 1	
Número de modos de falha (MF)	3
Ocorrência	Igual para todos os MF
Variável de resposta	Número de peças produzidas por uma máquina
Tempo simulado	8 horas
Número de dados gerados no experimento	80

O detalhamento dos níveis considerados no projeto experimental está apresentado na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental.

Fator	Nível -	Nível +
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação do operador de lapidadora cel. 2, uma vez em 8 horas. Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de B(0,8991; 1,4034; 20; 240) min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	0,685% das peças produzidas pela lapidadora 2_1 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela lapidadora. Programação se mantém durante todo o tempo simulado.
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	15,06% das peças produzidas pela lapidadora 2_1 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela lapidadora. Programação se mantém durante todo o tempo simulado.

Para a determinação dos efeitos dos fatores sobre a variável de resposta, foi também utilizado o projeto experimental fatorial completo  $2^k$ . Como o número de fatores foi igual a três, têm-se oito experimentos realizados. Cada experimento foi replicado 10 vezes. Desta forma, este primeiro cenário gerou um total de 80 valores para a variável de resposta (número de peças produzidas pela lapidadora 2\_1), como mostra a Tabela 6.25.

Tabela 6.25 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	MF A	MF B	MF D	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(-)	(-)	(-)	2830	2835	2784	2842	2751	3196	2908	2660	2800	3185	4,38
2	(+)	(-)	(-)	1625	1706	1583	1666	1694	1531	1643	1675	1564	1698	2,67
3	(-)	(+)	(-)	1676	2415	1960	2345	3080	1787	2743	2205	2205	2482	13,32
4	(+)	(+)	(-)	1915	1840	1707	1750	1825	1644	2128	2240	2011	2135	7,51
5	(-)	(-)	(+)	2380	2240	2267	2645	1855	1850	1706	2030	1791	1645	11,51
6	(+)	(-)	(+)	1645	1504	1571	1435	1855	1147	1181	1963	1505	1564	11,88
7	(-)	(+)	(+)	2138	2625	1820	2170	1803	1746	1956	1968	1815	2310	9,76
8	(+)	(+)	(+)	561	707	965	820	1015	735	715	1023	643	1097	15,91

Antes da determinação dos efeitos dos fatores, foi realizado o teste de normalidade nos resíduos e verificada a aleatoriedade dos mesmos. A Figura 6.50 mostra o teste de normalidade dos resíduos provenientes do cenário 1. O valor de *p-value* superior a 0,05 não rejeita a hipótese de normalidade.

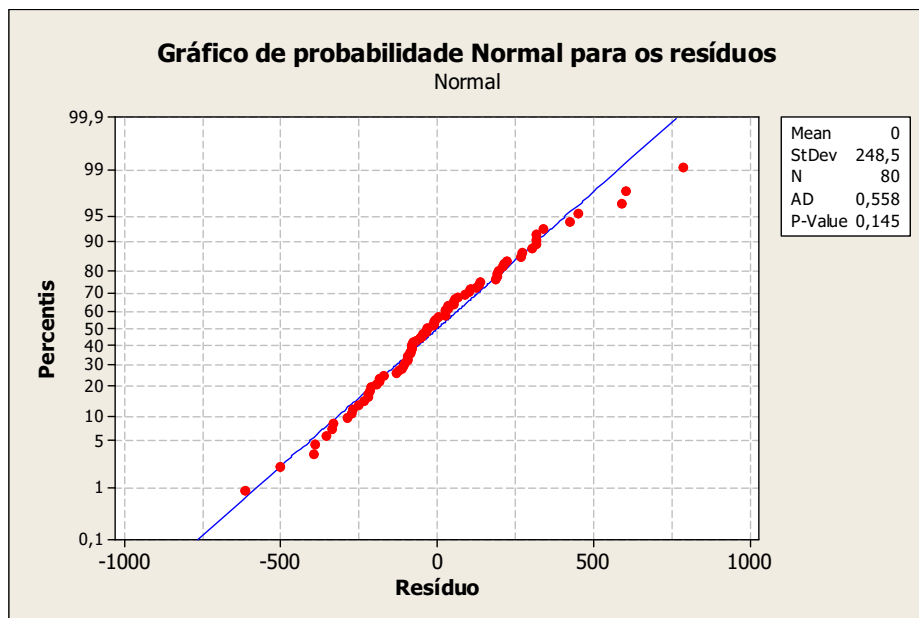


Figura 6.50 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 1, referente ao segundo objeto de estudo.

A independência dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.51.

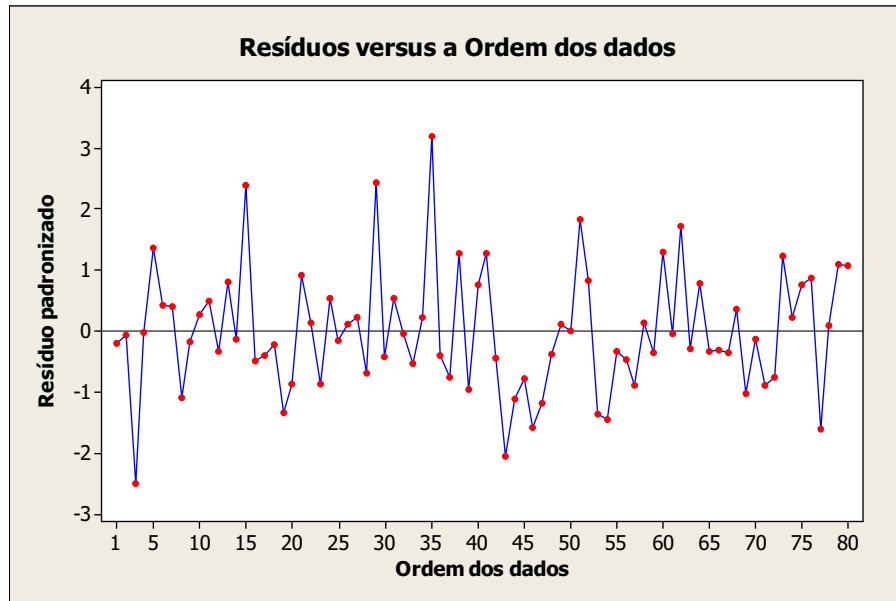


Figura 6.51 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 1, referente ao segundo objeto de estudo.

A seguir, determinou-se o efeito de cada modo de falha sobre o número de peças produzidas pela lapidadora 2\_1. A Figura 6.52 mostra estes efeitos.

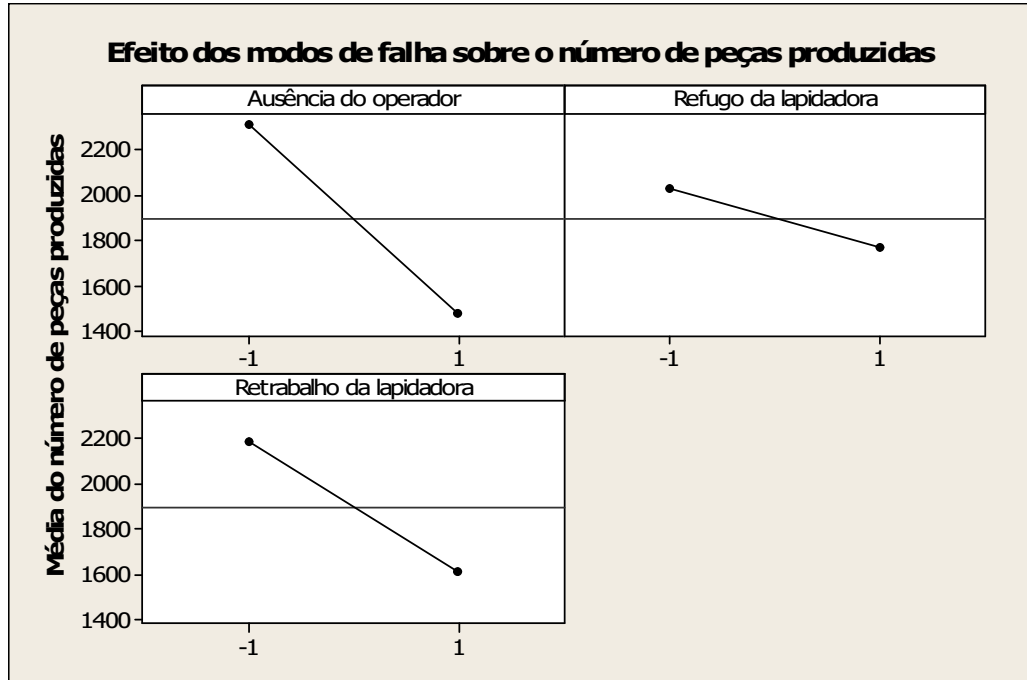


Figura 6.52 – Efeito dos modos de falha sobre o número de peças produzidas pela lapidadora 2\_1.

A análise da Figura 6.52 permite concluir que todos os modos de falha, quando ocorrem, diminuem o número de peças produzidas. A ordenação dos modos de falha e suas interações está representado na Figura 6.53.

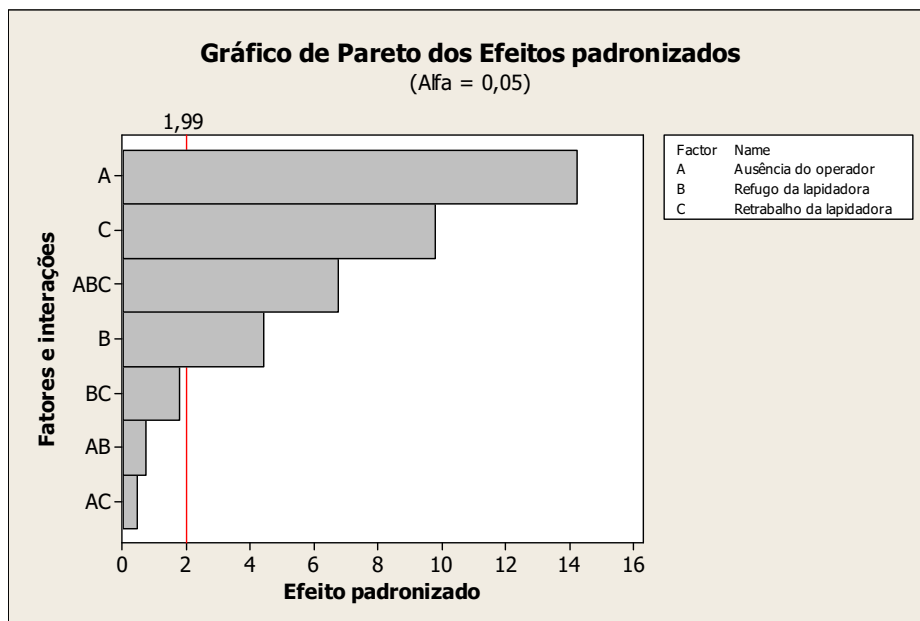


Figura 6.53 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela lapidadora 2\_1.

Neste cenário, somente foi analisada a gravidade do efeito dos modos de falha, independente da sua ocorrência (uma vez que todos os modos de falha ocorreram uma vez durante o tempo simulado). Além disto, o cenário 1 foca a gravidade local do efeito do modo de falha.

Segundo a Figura 6.53, pode-se afirmar que o modo de falha A, ausência do operador, gera o efeito local mais intenso sobre o número de peças produzidas pela máquina, seguido pelo modo de falha D (fator C na figura), retrabalho. Ainda pode ser observado o pequeno efeito das interações de segunda ordem dos modos de falha, considerados não significativos na Figura 6.53. Apenas na situação onde os três modos de falha atuam ocorre uma interação significativa (terceira ordem).

A ação conjunta dos três modos de falha pode ser observado na Figura 6.54. Nesta figura, a média do número de peças produzidas é representada em cada vértice do cubo. A ocorrência dos três modos de falha é registrada no vértice com os todos fatores no nível 1.

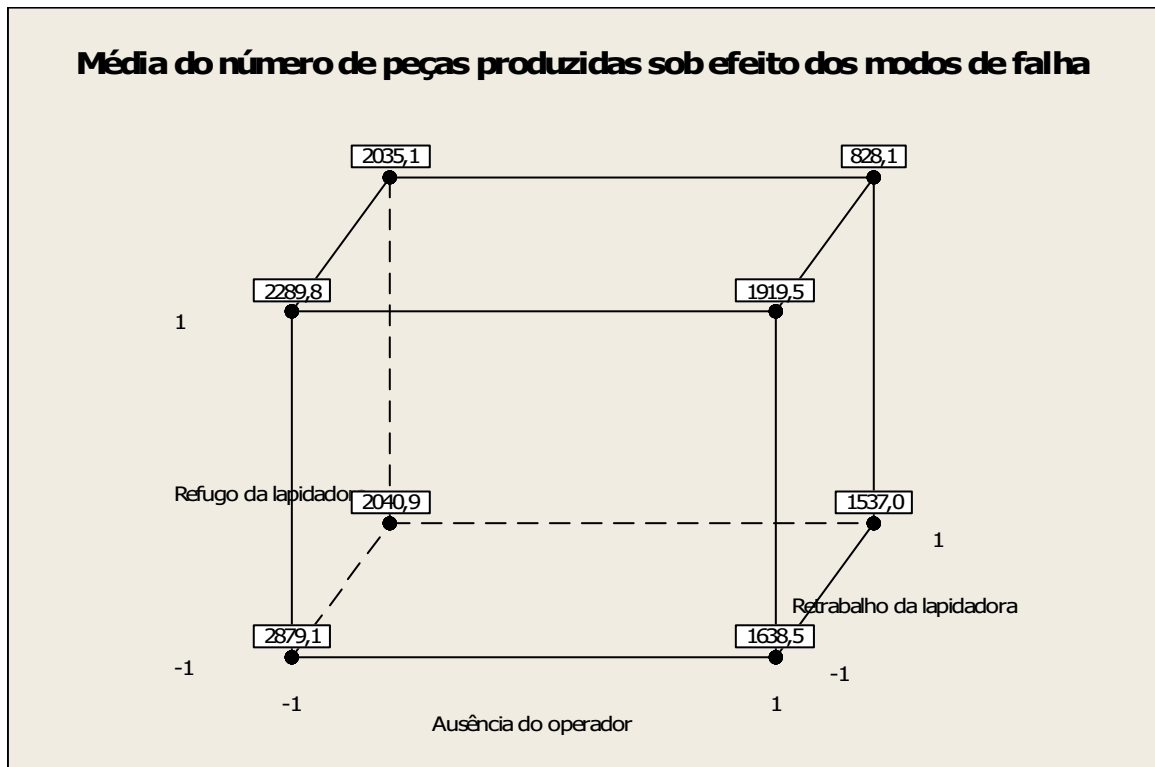


Figura 6.54 – Vértices do cubo com os valores da média do número de peças produzidas pela lapidadora 2\_1, sob ação dos modos de falha.

### 6.4.6 Análise do cenário 2

Este cenário difere do cenário 1 por analisar o número de peças produzidas por uma máquina retificadora. O tempo simulado permanece em 8 horas e os modos de falha ocorrem uma vez neste período, agindo sobre o funcionário que opera a retificadora e sobre a própria retificadora. O horário de ocorrência permanece com probabilidade uniforme durante as 8 horas. Considerou-se, assim, apenas uma célula de produção.

Neste cenário foi considerado um modo de falha a mais. A quebra de máquina é um modo de falha aplicável somente às retificadoras.

As Figuras 6.55 e 6.56 mostram o ponto de programação dos efeitos dos modos de falha do cenário 2. Já a Tabela 6.26 resume as características deste cenário 2.

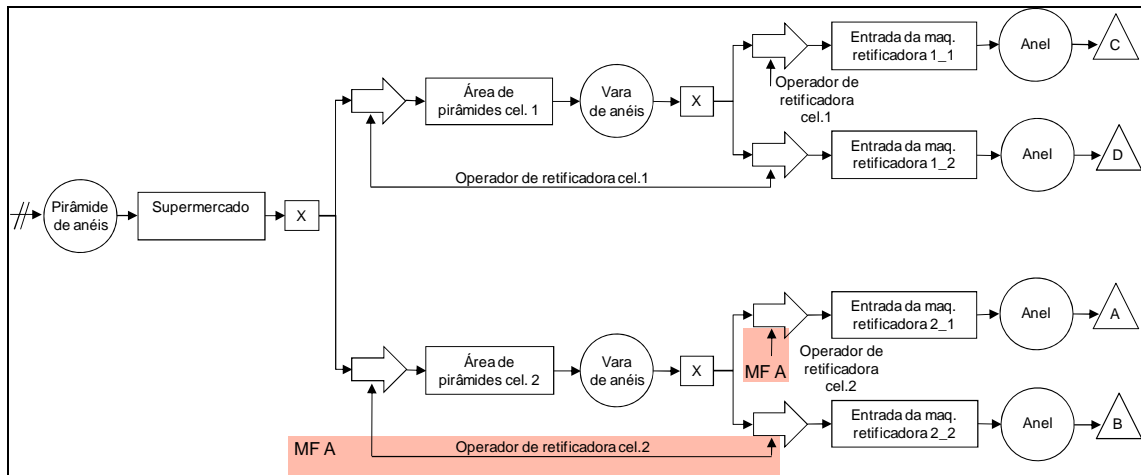


Figura 6.55 - Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 2 do segundo objeto de estudo.

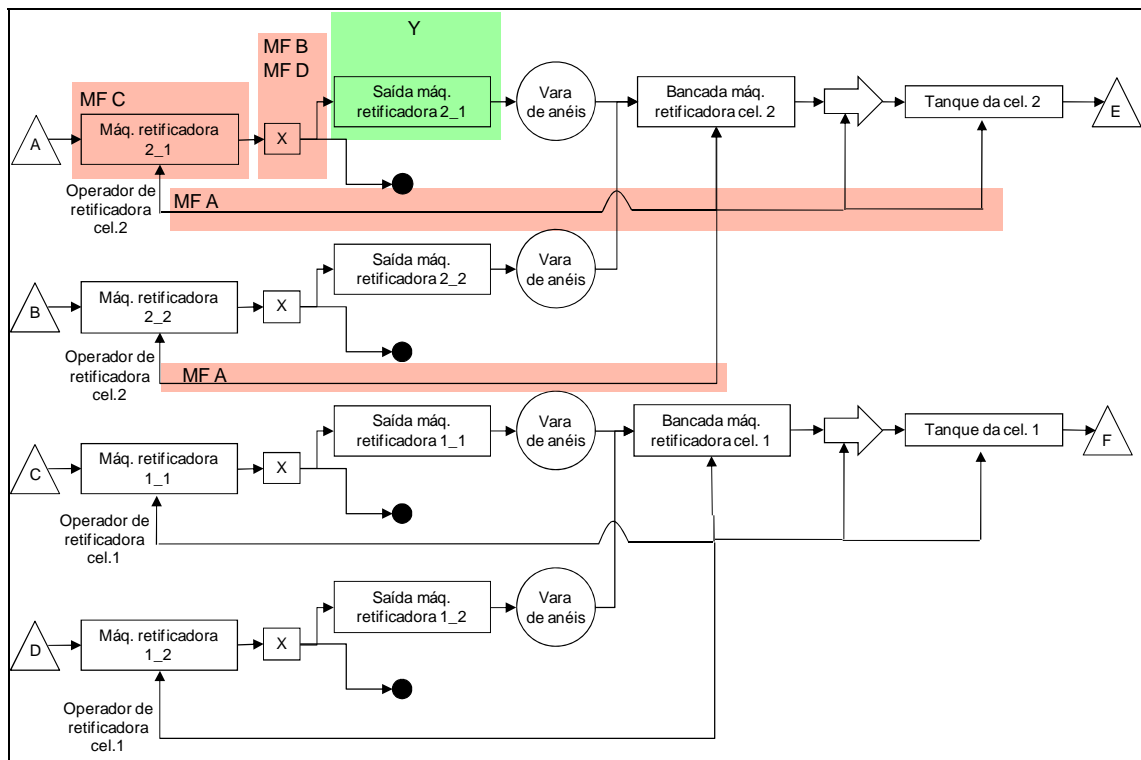


Figura 6.56 - Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta (Y) no cenário 2 do segundo objeto de estudo.

Tabela 6.26 - Definição do cenário 2.

Cenário 2	
Número de modos de falha (MF)	4
Ocorrência	Igual para todos os MF
Variável de resposta	Número de peças produzidas por uma máquina
Tempo simulado	8 horas
Número de dados gerados no experimento	160

O detalhamento de cada nível utilizado na matriz experimental segue apresentado na Tabela 6.27.

Tabela 6.27 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental.

Fator	Nível -	Nível +
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação do operador de retificadora cel. 2, uma vez em 8 horas.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de B(0,8991; 1,4034; 20; 240) min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	0,494% das peças produzidas pela retificadora 2_1 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela retificadora.  Programação se mantém durante todo o tempo simulado.
C: (Modo de falha C)	Modo de falha não ocorre	Paralisação da máquina retificadora 2_1, uma vez em 8 horas.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de N(231.9, 123.9) min.
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	23,33% das peças produzidas pela retificadora 2_1 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela retificadora.  Programação se mantém durante todo o tempo simulado.

Para a determinação dos efeitos dos fatores sobre a variável de resposta, foi também utilizado o projeto experimental fatorial completo  $2^k$ . Como o número de fatores foi igual a quatro, têm-se 16 experimentos a serem feitos. Cada experimento foi replicado 10 vezes. Desta forma, este segundo cenário gerou um total de 160 valores para a variável de resposta (número de peças produzidas pela retificadora 2\_1), como mostra a Tabela 6.28.

Tabela 6.28 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	MF A	MF B	MF C	MF D	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(-)	(-)	(-)	(-)	3195	3200	3100	3300	3150	3149	3200	3170	3081	3071	1,55
2	(+)	(-)	(-)	(-)	2500	2675	2687	2725	2693	2600	2650	2500	2600	2655	2,12
3	(-)	(+)	(-)	(-)	3083	2964	3080	2960	3138	3090	3072	3053	3000	3089	1,38
4	(+)	(+)	(-)	(-)	2500	2540	2400	2552	2451	2450	2597	2475	2686	2500	2,35
5	(-)	(-)	(+)	(-)	1500	1493	1500	1495	1518	1500	1551	1587	1486	1667	2,69
6	(+)	(-)	(+)	(-)	1284	1279	1200	1300	1225	1325	1121	1175	1200	1293	3,79
7	(-)	(+)	(+)	(-)	1827	1887	1910	1853	2005	1997	2003	2019	1900	1844	2,77
8	(+)	(+)	(+)	(-)	1119	1200	1293	1030	1100	1261	1001	995	998	1167	7,12
9	(-)	(-)	(-)	(+)	2402	2400	2351	2384	2450	2380	2417	2330	2423	2365	1,07
10	(+)	(-)	(-)	(+)	1896	1827	1812	2184	1834	1781	1863	2033	1821	1775	4,90
11	(-)	(+)	(-)	(+)	2430	2377	2328	2382	2380	2337	2363	2348	2438	2290	1,36
12	(+)	(+)	(-)	(+)	1247	1255	1400	1361	1349	1392	1300	1300	1390	1400	3,18
13	(-)	(-)	(+)	(+)	970	1100	1117	1100	1128	970	1108	1185	1126	1089	4,47
14	(+)	(-)	(+)	(+)	1267	1175	1250	1254	1296	1300	1313	1220	1386	1291	3,19
15	(-)	(+)	(+)	(+)	1315	1375	1379	1468	1312	1300	1389	1350	1440	1405	2,89
16	(+)	(+)	(+)	(+)	597	547	590	604	555	641	538	531	636	562	4,86

A Figura 6.57 mostra o teste de normalidade dos resíduos provenientes do cenário 2. O valor de *p-value* superior a 0,05 não rejeita a hipótese de normalidade.

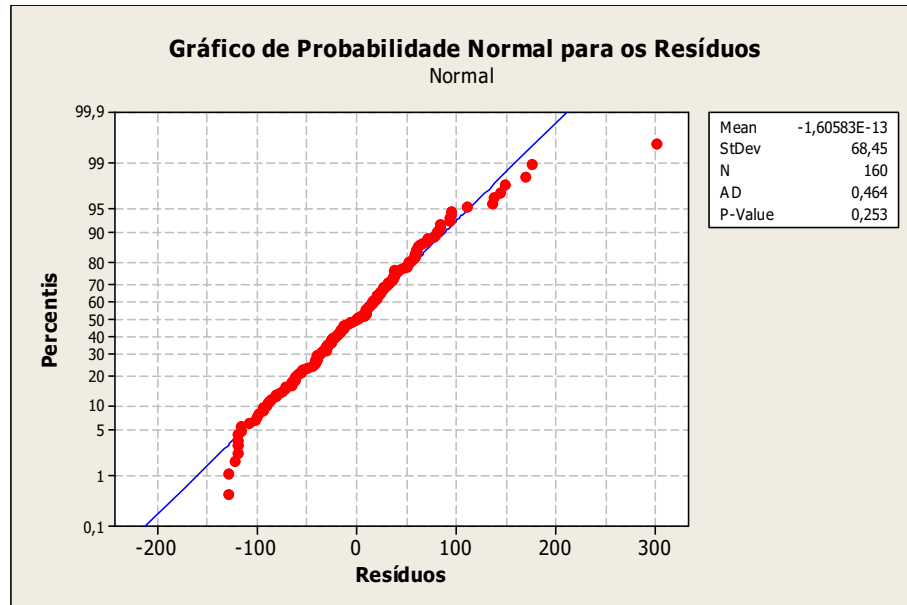


Figura 6.57 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 2, referente ao segundo objeto de estudo.

A independência dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.58.

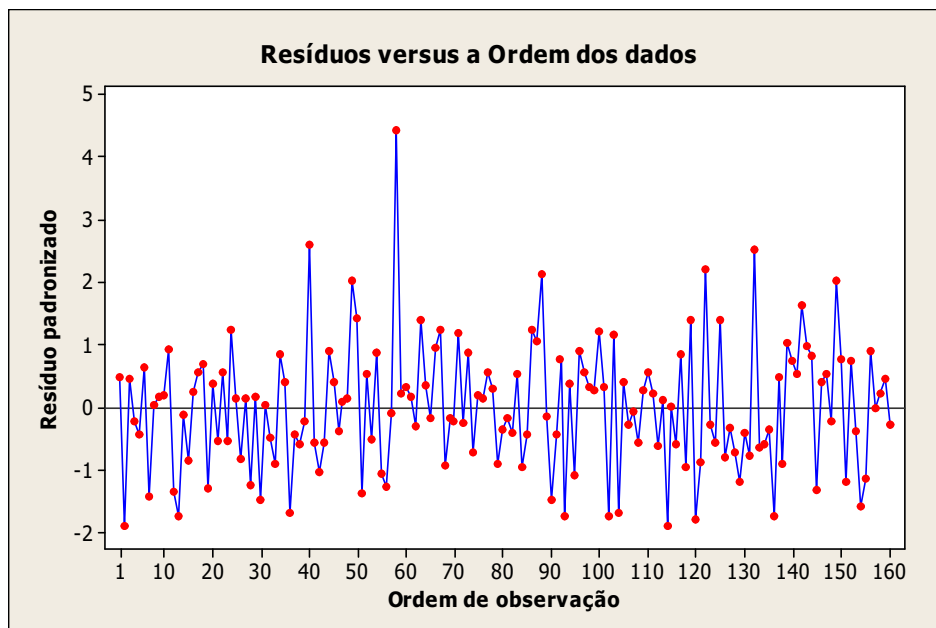


Figura 6.58 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 2, referente ao segundo objeto de estudo.

A seguir, determinou-se o efeito de cada modo de falha sobre o número de peças produzidas pela retificadora 2\_1. A Figura 6.59 mostra estes efeitos.

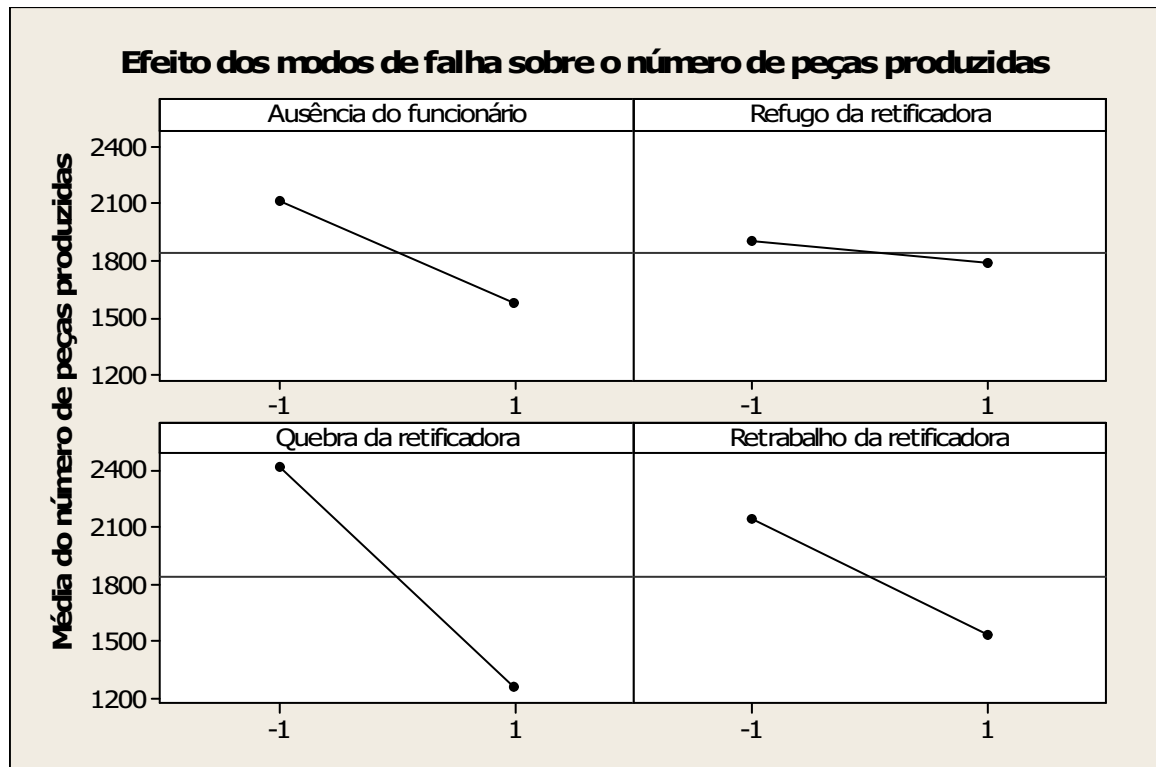


Figura 6.59 – Efeito dos modos de falha sobre o número de peças produzidas pela retificadora 2\_1.

A análise da Figura 6.59 permite concluir que todos os modos de falha, quando ocorrem, diminuem o número de peças produzidas. A ordenação dos efeitos mais impactantes e suas interações segue representada na Figura 6.60.

Neste caso, considerando a retificadora, observa-se que o modo de falha C, quebra de máquina, apresenta-se com o efeito mais significativo sobre o número de peças produzidas, afetando negativamente a produção. O modo de falha A, ausência do funcionário, que se mostrou no topo do *ranking* do cenário 1, ainda apresenta forte efeito neste cenário, porém agora na terceira posição.

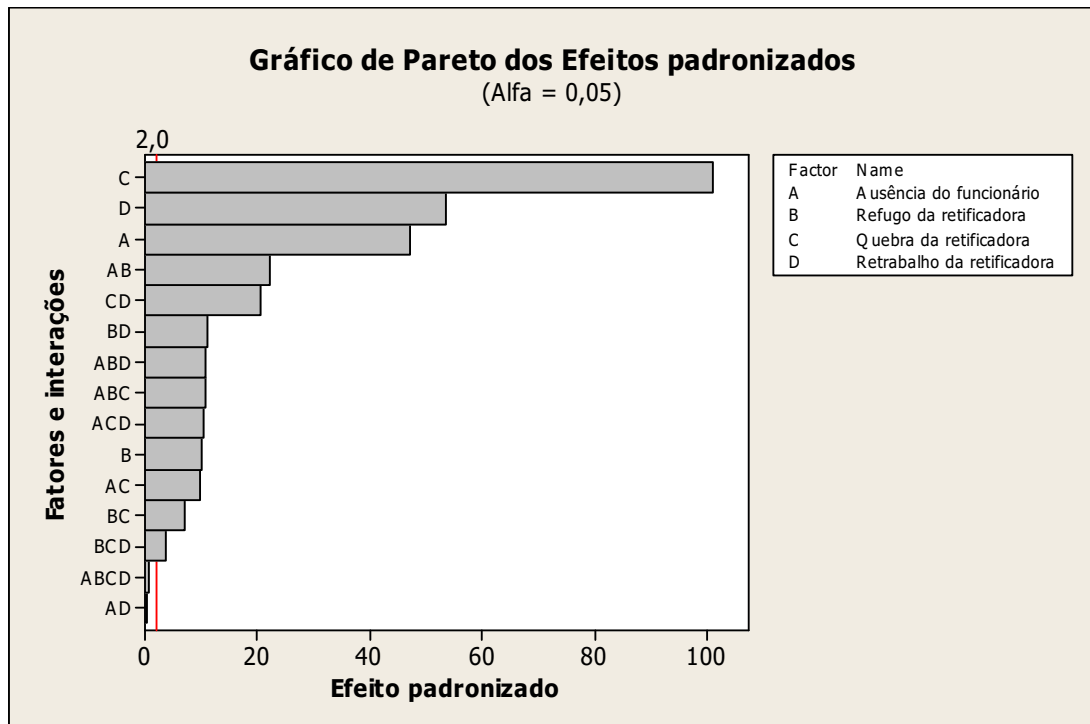


Figura 6.60 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pela retificadora 2\_1.

Além dos efeitos individuais causados pelos modos de falha C e D, a análise alerta para o efeito da interação de A e B, e C e D. A Figura ainda mostra que o modo de falha B, refugo, apesar de significativo, apresenta o menor dos efeitos comparado aos demais modos de falha. Embora com pequeno efeito isolado, o modo de falha B, em conjunto com o modo de falha A, causa um efeito interativo de destaque no *ranking*. Uma vez que se conhece a importância dos efeitos das interações, torna-se necessário verificar de que forma estas interações afetam a variável de resposta. A Figura 6.61 demonstra as interações de segunda ordem.

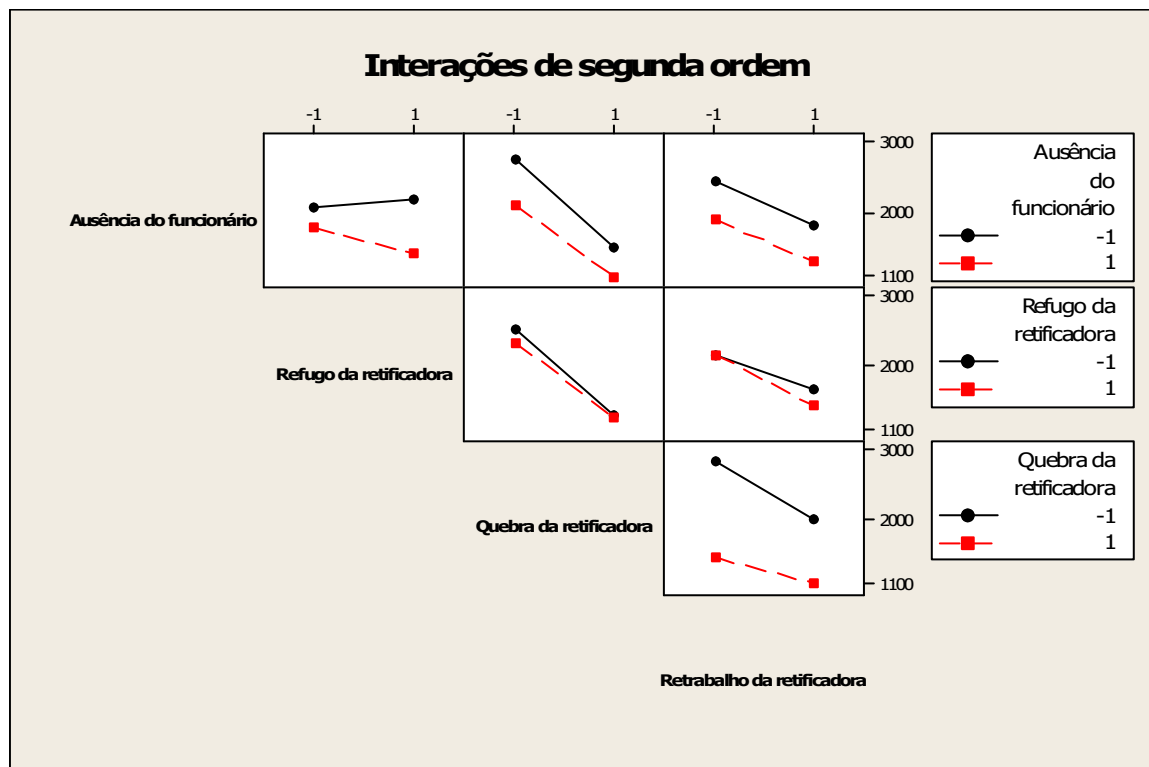


Figura 6.61 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas retificadora 2\_1.

Os cruzamentos da linha “refugo da retificadora” com as colunas “quebra da retificadora” e “retrabalho da retificadora”, na Figura 6.61, mostram que a presença ou não do modo de falha “refugo da retificadora” pouco afeta os efeitos dos modos de falha “quebra da retificadora” e “retrabalho da retificadora”.

O cruzamento da linha “ausência do funcionário” e da coluna “refugo da retificadora”, na Figura 6.61, mostra que a situação de não ocorrência do modo de falha “ausência do funcionário” praticamente não interfere na ação do modo de falha “refugo da retificadora”. Isto pode ser explicado pelo pequeno efeito do modo de falha “refugo da retificadora”. Um cuidado especial deve ser tomado na interpretação da Figura 6.61 neste caso. Fixando a não ocorrência do modo de falha “ausência do funcionário”, percebe-se que a média da produção aumenta um pouco com a ocorrência do modo de falha “refugo da retificadora”.

Este ligeiro aumento pode ser explicado pela variação encontrada nos resultados simulados, e não que o modo de falha aumentasse o número de peças produzidas. Ou seja, neste caso a variação dos resultados simulados (variação esta natural de uma simulação estocástica) sobrepôs o efeito do modo de falha “refugo da retificadora”.

Vale lembrar que estes dois cenários apresentados, referentes ao segundo objeto de estudo, não levaram em consideração a ocorrência dos modos de falha. Além disto, estes efeitos apresentados são efeitos locais. A seguir, apresentam-se os cenários que contemplam a questão da ocorrência e do efeito global.

### 6.4.7 Análise do cenário 3

Neste cenário, foi avaliado o efeito dos modos de falha de forma global, considerando toda a célula 2. Os modos de falha atuaram sobre as duas máquinas retificadoras, as três lapidadoras e os dois funcionários. A ocorrência de cada modo de falha foi programada segundo o tempo médio entre falhas. O tempo simulado foi de uma semana (18 turnos, ou 144 horas).

Como os modos de falha B (refugo) e D (retrabalho) possuem efeitos diferentes, quando considerado o tipo de máquina, este cenário considerou uma diferenciação aplicada a estes modos de falha. Tem-se assim seis modos de falhas, como mostra a Tabela 6.29.

Tabela 6.29 – Caracterização da ocorrência de cada modo de falha (MF) no cenário 3, de acordo com os dados coletados.

Modo de falha	Ocorrências do MF na célula 2	TMEF
A – Ausência do operador	6,25 por funcionário	188,16 horas
B – Refugo na retificadora	20,25 por retificadora	7,26 turnos
C – Refugo na lapidadora	16,67 por lapidadora	8,82 turnos
D – Quebra da retificadora	2,25 por retificadora	522,67 horas
E – Retrabalho na retificadora	1,75 por retificadora	84 turnos
F – Retrabalho na lapidadora	8,67 por lapidadora	16,96 turnos

Da mesma forma realizada anteriormente, foi realizada a equalização das ocorrências. Mais uma vez, ressalta-se que o objetivo é a posição no *ranking*, que pode ser obtido de forma mais ágil através de uma equalização no tempo médio entre falhas.

O tempo simulado neste cenário foi de uma semana, totalizando 18 turnos de trabalho. Para a equalização, considerou-se que o maior tempo entre falhas (84 turnos, como mostra a Tabela 6.29) passa a equivaler 18 turnos, o que faz com que o modo de

falha E ocorra uma vez nesta semana simulada. A partir daí, todos os TMEF serão equalizados a partir desta referência, como mostra a Tabela 6.30.

Tabela 6.30 – Equalização das ocorrências.

Modo de falha	TMEF real	TMEF equalizado	Ocorrências em 1 semana (equalizado)
A	188,16 horas	40,32 horas	4 vezes
B	7,26 turnos	1,5 turnos	12 vezes
C	8,82 turnos	1,89 turnos	9 vezes
D	522,67 horas	111,92 horas	1 vez
E	84 turnos	18 turnos	1 vez
F	16,96 turnos	3,63 turnos	5 vezes

Vale lembrar que, no caso dos modos de falha refugo e retrabalho, a ocorrência equivale a um turno inteiro afetado. Nos demais casos, o tempo de duração do modo de falha depende das distribuições selecionadas.

A primeira ocorrência de cada modo de falha ocorre em um momento aleatório, segundo uma distribuição uniforme de probabilidade de ocorrência dentro do período. Entretanto, obrigatoriamente cada modo de falha ocorre segundo o número de ocorrências estipulado na Tabela 6.30. A Tabela 6.31 resume as características do cenário 3.

Tabela 6.31 - Definição do cenário 3

<b>Cenário 3</b>	
Número de modos de falha (MF)	6
Ocorrência	Proporcional ao TMEF
Variável de resposta	Número de peças produzidas pela célula
Tempo simulado	144 horas
Número de dados gerados no experimento	640

A definição deste cenário está representada na modelagem em IDEF-SIM mostrada nas Figuras 6.62, 6.63, 6.64 e 6.65.

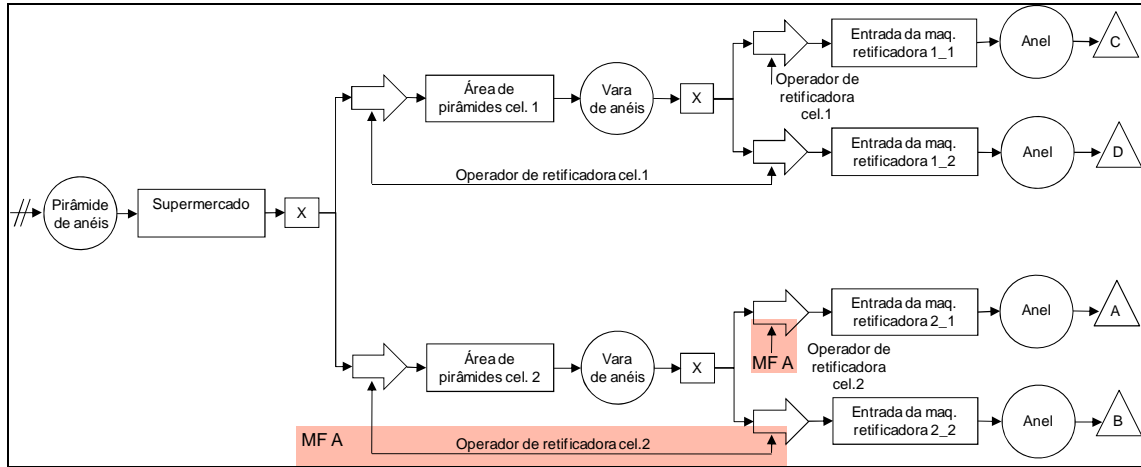


Figura 6.62 – Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo.

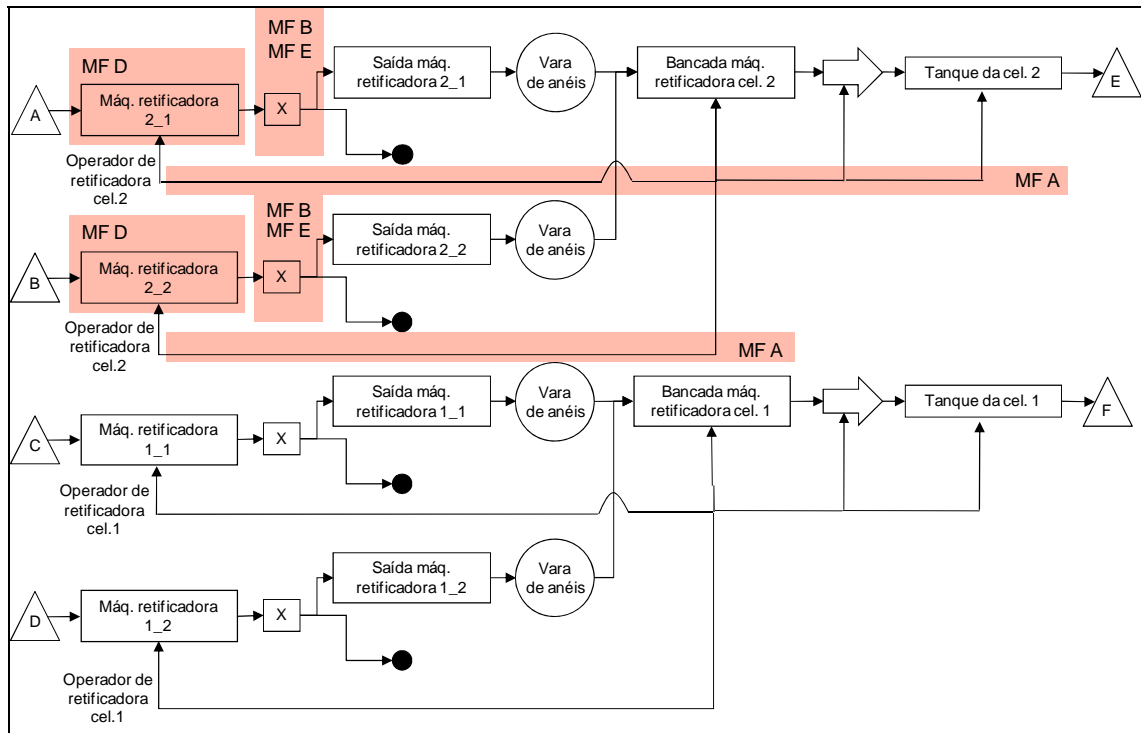


Figura 6.63 – Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo.

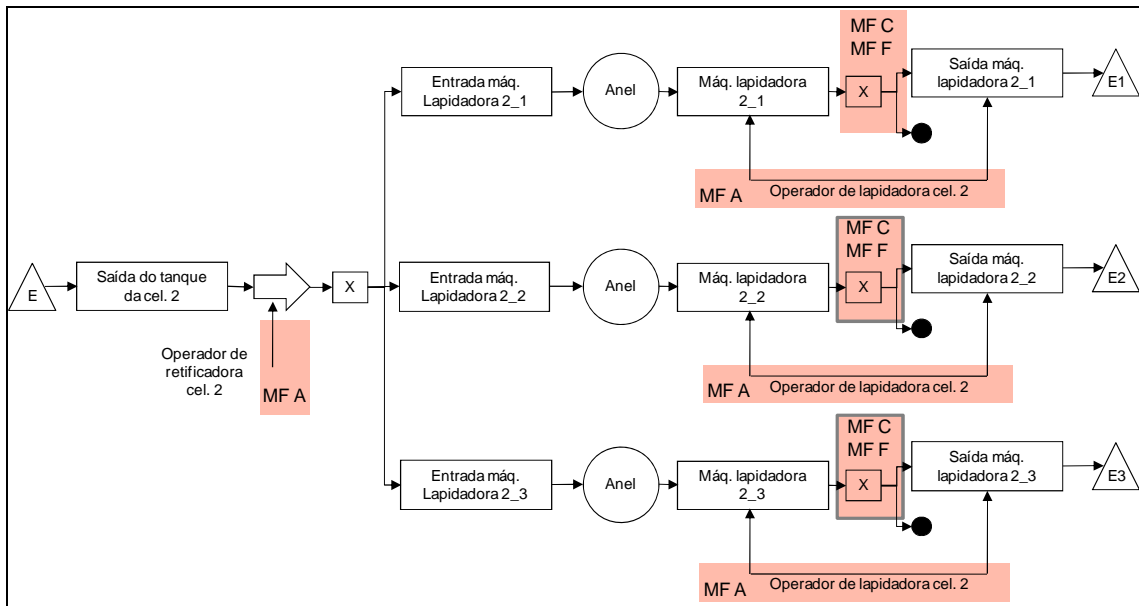


Figura 6.64 – Terceira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 3 do segundo objeto de estudo.

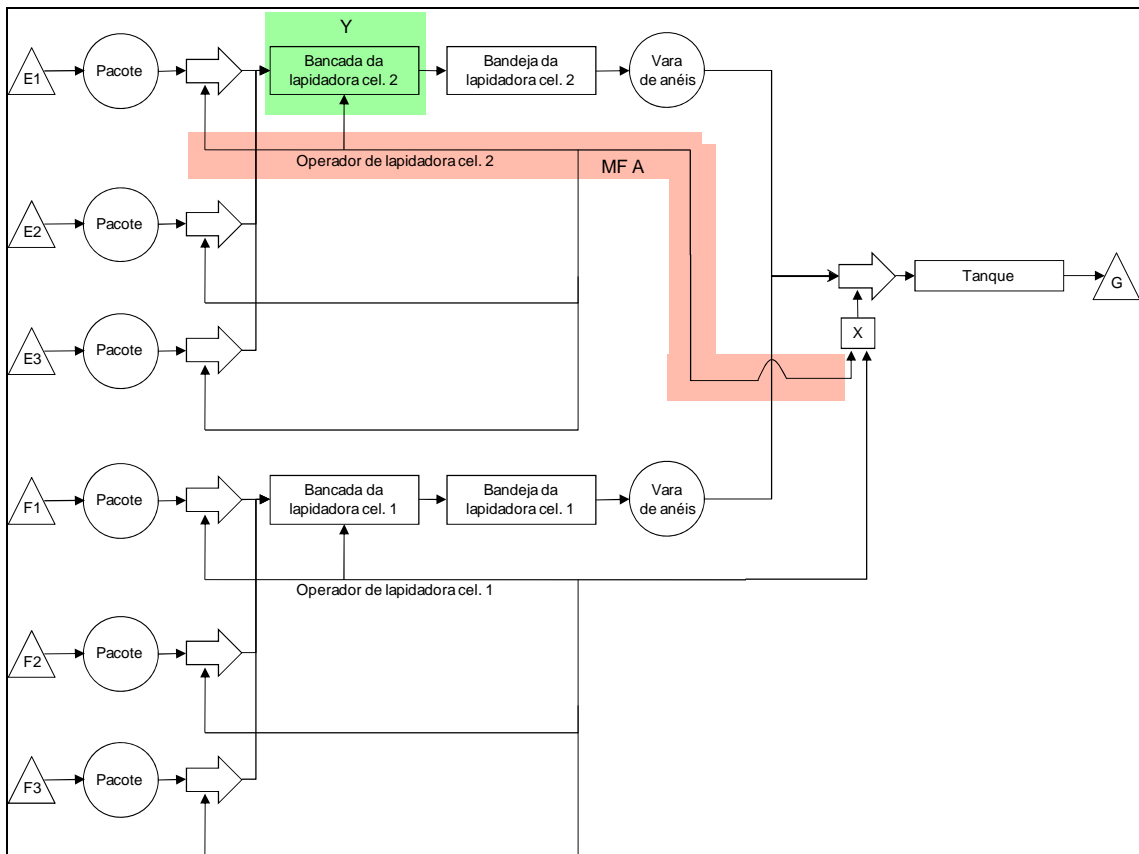


Figura 6.65 – Quarta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta Y no cenário 3 do segundo objeto de estudo.

Na Figura 6.65 pode-se notar que a variável de resposta está posicionada apenas no final do fluxo da célula 2, de forma que os três fluxos E1, E2 e E3 convergem para o ponto onde foi posicionada esta variável. Neste cenário é válido destacar uma das funções da modelagem em IDEF-SIM, representada na Figura 6.65: pelo fato do transporte realizado imediatamente antes do tanque contemplar a regra OU (X), o modo de falha A não é condição suficiente para interromper a função do tanque.

Foi gerada assim uma matriz experimental com seis fatores, como mostra a Tabela 6.32.

Tabela 6.32 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental

Fator	Nível -	Nível +
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação do operador de retificadora da célula 2 e do operador de lapidadora da célula 2, 4 vezes cada um, em 18 turnos simulados.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $B(0,8991; 1,4034; 20; 240)$ min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	0,494% das peças produzidas pela retificadoras da célula 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela célula.  12 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.
C: (Modo de falha C)	Modo de falha não ocorre	0,685% das peças produzidas pelas lapidadoras da célula 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela célula.  9 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	Paralisação das máquinas retificadoras da célula 2, uma vez em 18 turnos.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $N(231.9, 123.9)$ min.
E: (Modo de falha E)	Modo de falha não ocorre	23,33% das peças produzidas pelas retificadoras da célula 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela célula.  1 dos 18 turnos simulados foi afetado por este modo de falha.
F: (Modo de falha F)	Modo de falha não ocorre	15,06% das peças produzidas pelas lapidadoras da célula 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pela célula.  5 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.

Os 640 dados obtidos no experimento estão representados na Tabela 6.33. Nesta simulação, cada um dos 64 experimentos, com suas 10 réplicas, demandou 4 minutos e 25 segundos de tempo de processamento, totalizando 4 horas e 43 minutos de processamento. Não se pode considerar este tempo como o tempo total gasto no preenchimento da matriz experimental, pois entre cada experimento foi realizado a programação referente ao próximo experimento.

Tabela 6.33 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	MF A	MF B	MF C	MF D	MF E	MF F	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	3097	3105	3118	3107	3085	3129	3097	3040	3099	3079	0,561852
2	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	2839	2869	2856	2943	2841	2924	2960	2937	2847	2995	1,405946
3	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	3042	3058	3045	3038	3080	3080	3061	3065	3059	3080	0,369808
4	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	2804	2800	2805	2861	2798	2841	2885	2812	2856	2792	0,824586
5	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	3082	3083	3089	3119	3077	3103	3100	3087	3059	3061	0,425906
6	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	2866	2897	2837	2893	2907	2864	2892	2831	2903	2910	0,714533
7	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	3037	3027	3026	3082	3015	3065	3026	3038	3037	3019	0,493559
8	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	2780	2743	2775	2802	2739	2739	2799	2734	2802	2746	0,884423
9	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	3024	3039	2987	2974	2979	2969	3030	2973	3024	3008	0,645361
10	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	2781	2825	2789	2771	2793	2788	2771	2868	2800	2849	0,844482
11	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	2962	3024	2968	3017	2968	2912	2968	3024	2968	2979	0,829358
12	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	2733	2747	2800	2811	2745	2799	2749	2829	2794	2868	1,113778
13	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	3060	3066	3061	3057	3030	3041	3013	3059	3029	3062	0,427659
14	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	2813	2800	2747	2805	2775	2757	2840	2773	2749	2786	0,774747
15	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	3014	2964	3017	2997	3013	3015	3013	3009	2987	2973	0,458314
16	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	2788	2814	2747	2789	2762	2749	2808	2776	2768	2705	0,831888
17	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	3027	3039	3025	3047	3010	3039	3027	3050	3033	3027	0,278239
18	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	2870	2786	2838	2903	2861	2912	2869	2879	2864	2914	0,948951
19	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	3010	3024	3024	3024	3087	3024	3026	3025	3024	3024	0,491099
20	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	2820	2847	2764	2811	2806	2799	2807	2788	2787	2788	0,572926
21	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	3013	3019	3043	3027	3067	3008	3031	3010	3032	3029	0,416533
22	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	2813	2841	2734	2724	2779	2731	2802	2767	2773	2749	0,993965
23	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	3039	3010	3017	3015	3011	3017	2999	3019	3011	3024	0,247202
24	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	2737	2801	2762	2802	2741	2799	2788	2811	2723	2859	1,063987
25	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	2912	2968	2991	2912	2905	2929	2912	2981	2933	2923	0,769016
26	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	2739	2750	2751	2789	2700	2744	2717	2800	2719	2749	0,802403
27	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	2928	2915	2968	2968	2912	2879	2968	2931	2902	2912	0,752945
28	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	2687	2744	2731	2689	2666	2780	2744	2733	2671	2800	1,192704
29	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	2959	2945	2956	3009	2915	2896	2956	2954	2991	2900	0,883745
30	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	2745	2795	2799	2713	2735	2684	2755	2733	2691	2796	1,098613
31	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	2917	2896	2923	2900	2943	2945	2971	2943	2905	2914	0,587959
32	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	2653	2780	2711	2771	2768	2683	2747	2679	2703	2707	1,152272
33	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	2972	2963	2953	2965	2971	2969	2971	2979	2997	2984	0,291007
34	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	2680	2766	2716	2747	2700	2665	2692	2697	2769	2731	0,943932
35	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	2905	2917	2899	2902	2917	2903	2914	2947	2907	2917	0,339346
36	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	2697	2763	2770	2676	2693	2744	2690	2705	2697	2717	0,857479
37	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	2959	2976	2969	2949	2975	2963	2955	2958	2953	2944	0,257896
38	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	2693	2691	2746	2708	2691	2745	2708	2711	2727	2697	0,553537
39	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	2907	2909	2917	2897	2915	2884	2917	2911	2905	2915	0,255967
40	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	2679	2737	2733	2708	2659	2757	2677	2716	2746	2689	0,874395
41	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	2859	2877	2894	2890	2842	2819	2858	2901	2861	2861	0,624947
42	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	2662	2635	2619	2679	2711	2718	2645	2690	2620	2669	0,946578
43	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	2819	2864	2796	2837	2785	2833	2801	2840	2820	2845	0,621158
44	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	2643	2597	2602	2652	2603	2655	2661	2712	2593	2670	1,05897
45	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	2882	2913	2920	2889	2835	2859	2907	2921	2855	2980	1,030118
46	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	2632	2621	2663	2626	2658	2597	2598	2701	2683	2700	1,050461
47	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	2823	2833	2882	2868	2805	2796	2794	2845	2849	2782	0,847513
48	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	2569	2587	2637	2589	2621	2626	2585	2661	2634	2656	0,875782
49	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	2903	2893	2915	2917	2907	2917	2911	2949	2905	2885	0,420725
50	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	2689	2696	2669	2684	2635	2655	2731	2721	2693	2635	0,870389
51	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	2883	2899	2913	2900	2873	2899	2905	2893	2899	2897	0,275396
52	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	2680	2711	2690	2637	2624	2695	2710	2720	2696	2671	0,841859
53	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	2907	2914	2889	2898	2889	2898	2899	2861	2885	2886	0,354582
54	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	2660	2715	2719	2719	2679	2634	2728	2755	2710	2689	0,940436
55	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	2878	2886	2884	2884	2882	2868	2888	2870	2885	2893	0,19309
56	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	2641	2686	2670	2635	2670	2679	2661	2714	2681	2686	0,614015
57	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	2804	2805	2803	2859	2771	2863	2841	2841	2861	2836	0,783547
58	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	2629	2595	2678	2689	2626	2642	2632	2632	2623	2617	0,756039
59	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	2774	2824	2846	2807	2850	2833	2830	2805	2828	2845	0,58947
60	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	2605	2671	2671	2642	2690	2684	2601	2679	2696	2611	0,997382
61	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	2793	2859	2851	2877	2805	2831	2827	2841	2827	2795	0,69637
62	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	2663	2664	2634	2635	2608	2683	2710	2637	2667	2634	0,797481
63	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	2795	2833	2859	2818	2811	2763	2797	2853	2799	2864	0,829556
64	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	2625	2656	2689	2621	2665	2690	2603	2662	2648	2663	0,768781

As verificações de normalidade dos resíduos e independência estão representadas nas Figuras 6.66 e 6.67. O valor de *p-value* na Figura 6.66, superior a 0,05, não rejeita

a hipótese de normalidade. A independência dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.67.

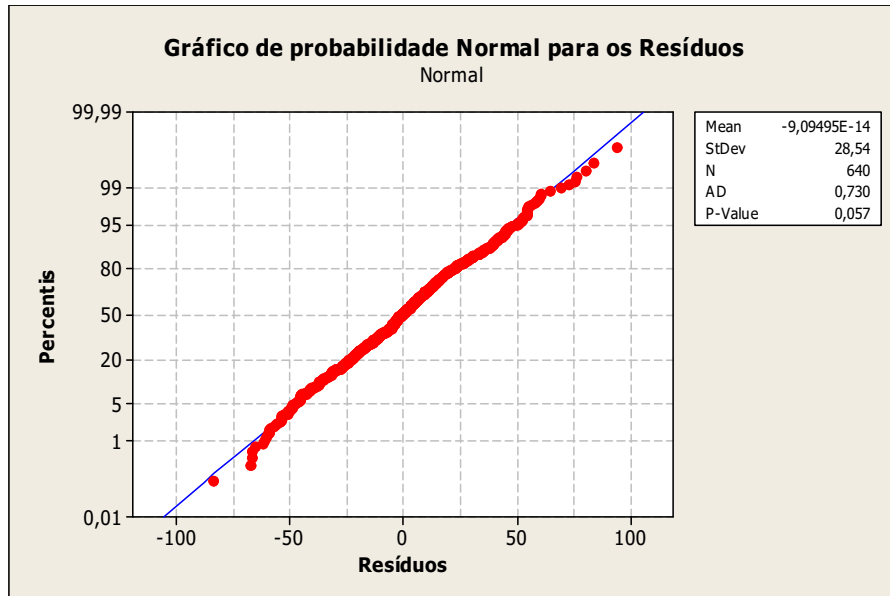


Figura 6.66 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 3, referente ao segundo objeto de estudo.

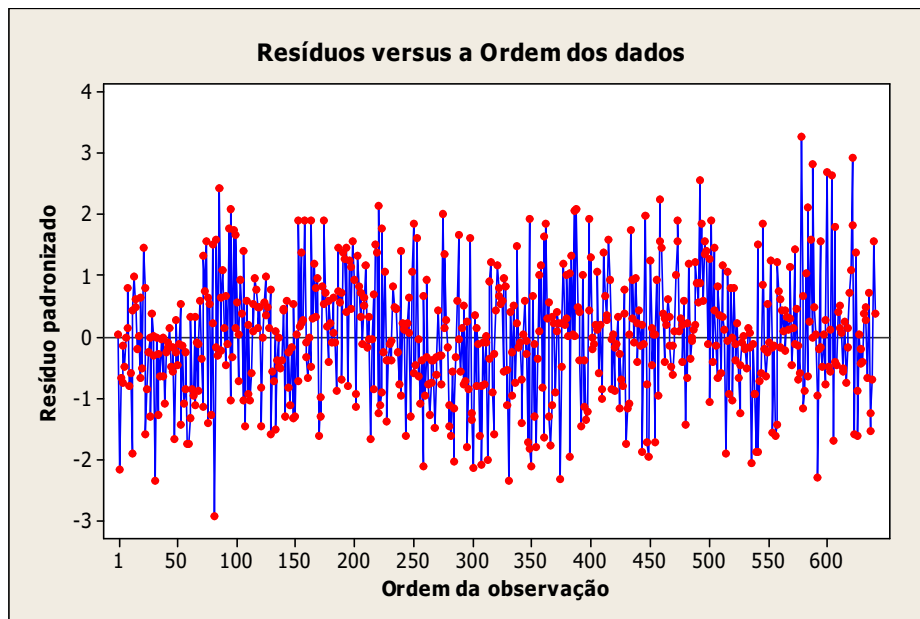


Figura 6.67 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 3, referente ao segundo objeto de estudo.

A Figura 6.68 mostra a ação dos efeitos principais dos modos de falha, enquanto a Figura 6.69 mostra a importância de cada efeito, através da ordenação gerada.



Observa-se na Figura 6.69 que o modo de falha A (ausência do funcionário) assume a posição de modo de falha com maior impacto na produção da célula 2. Este fato é reforçado pela observação dos modelos em IDEF-SIM registrados neste cenário. O nível de participação do funcionário é muito grande, totalizando operações e transportes, em toda a célula.

As interações observadas neste cenário apresentaram pouca significância, como comprovado na Figura 6.70.

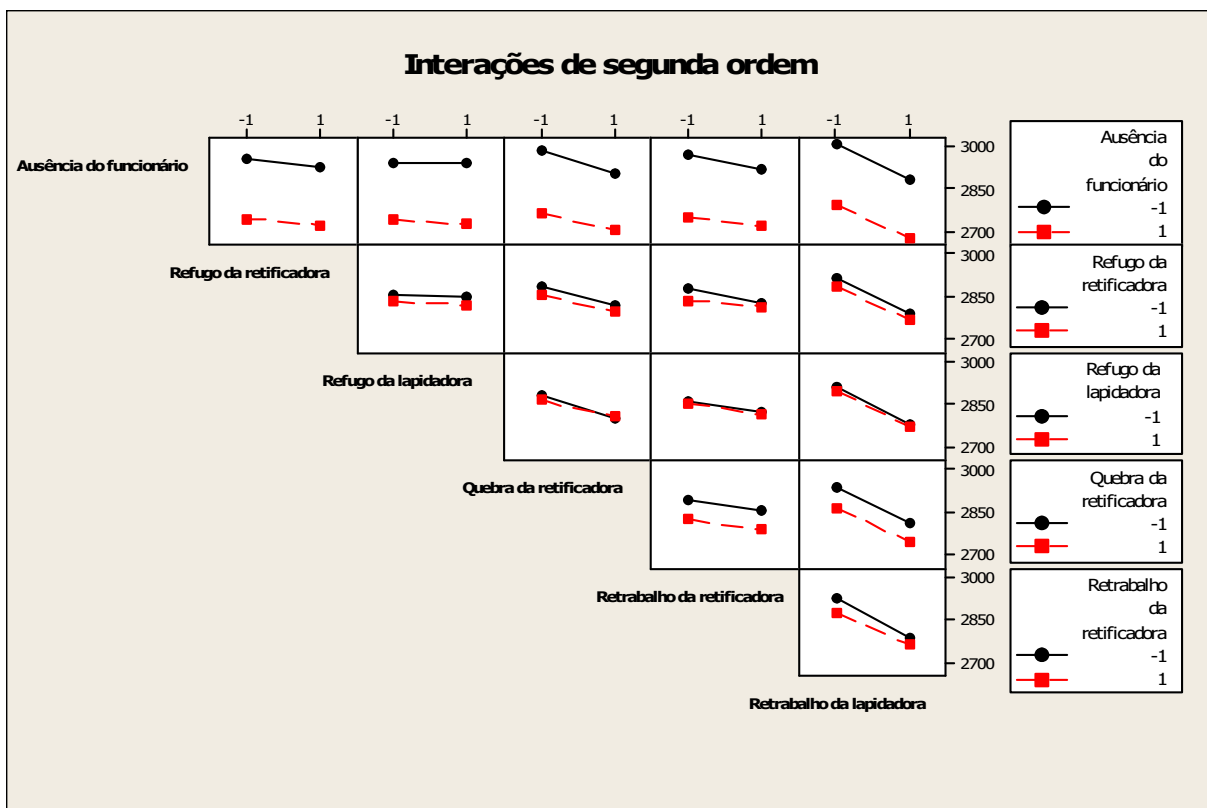


Figura 6.70 – Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pela célula 2.

Ainda é possível apresentar uma avaliação mais ampla, considerando todas as duas células deste objeto de estudo. Esta avaliação caracteriza o próximo e último cenário.

### 6.4.8 Análise do cenário 4

Neste cenário foi avaliado o efeito dos modos de falha de forma global, considerando agora as células 1 e 2. Os modos de falha atuaram sobre as quatro máquinas retificadoras, as seis lapidadoras e os quatro funcionários. A ocorrência de cada modo de falha foi programada segundo o tempo médio entre falhas. O tempo simulado foi de uma semana (18 turnos, ou 144 horas).

A modelagem dos modos de falha é a mesma realizada no cenário 3. Porém, agora o número de funções e recursos envolvidos é maior, totalizando assim a análise nas duas células. A Tabela 6.34 resume as características do cenário 4.

Tabela 6.34 - Definição do cenário 4

Cenário 4	
Número de modos de falha (MF)	6
Ocorrência	Proporcional ao TMEF
Variável de resposta	Número de peças produzidas pelas 2 células
Tempo simulado	144 horas
Número de dados gerados no experimento	640

A definição deste cenário está representada na modelagem em IDEF-SIM mostrada nas Figuras 6.71, 6.72, 6.73, 6.74 e 6.75.

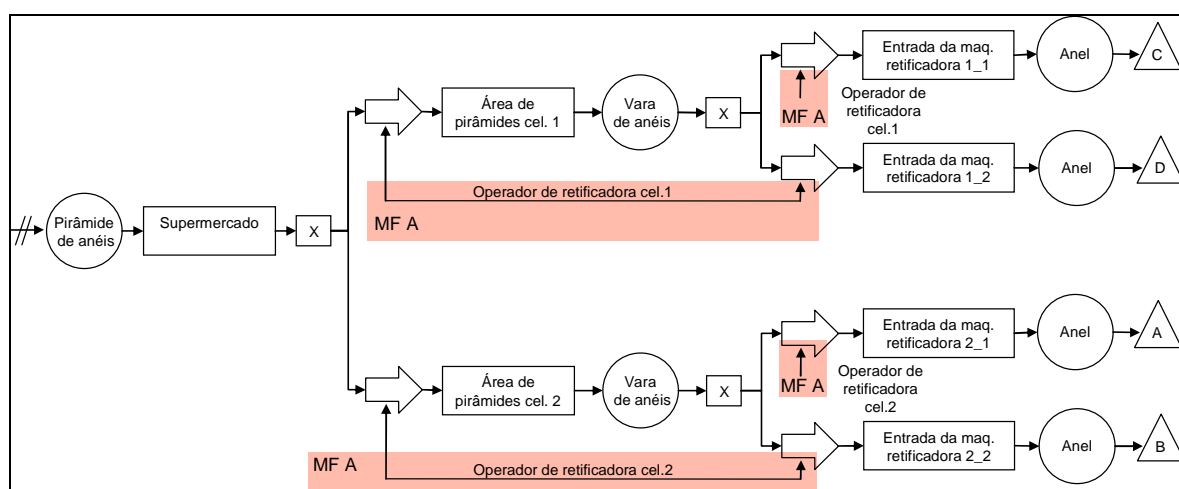


Figura 6.71 – Primeira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo.

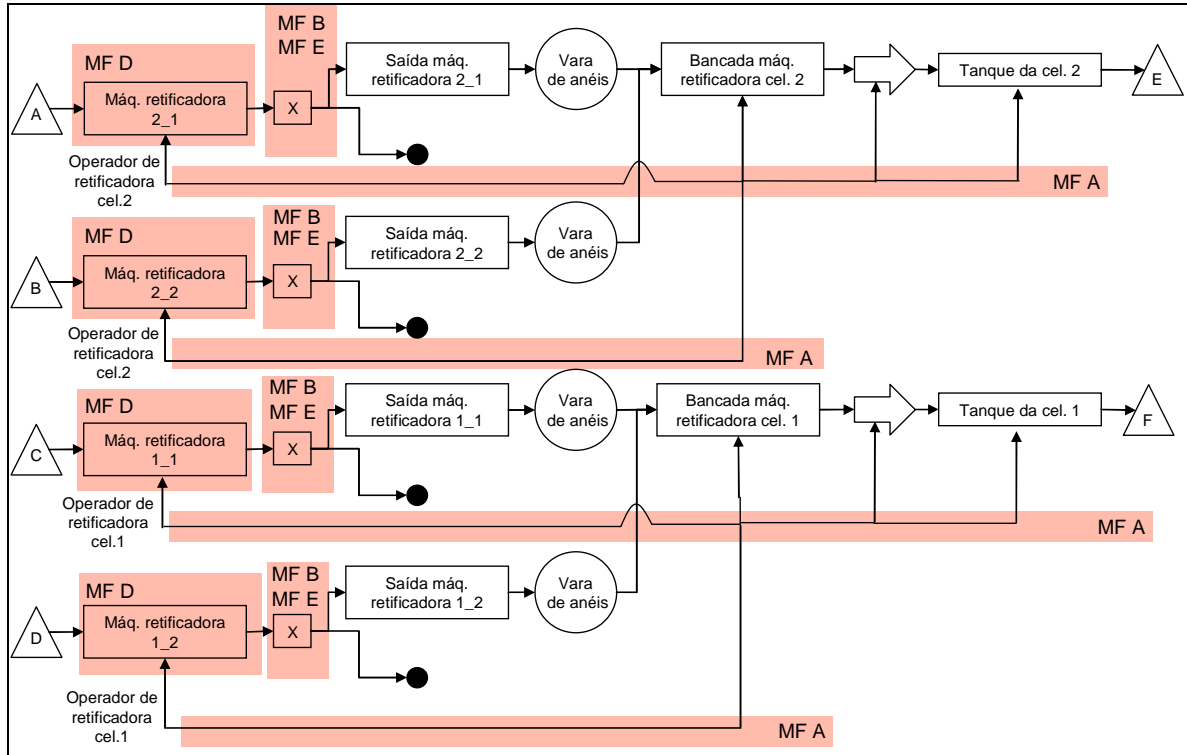


Figura 6.72 – Segunda parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo.

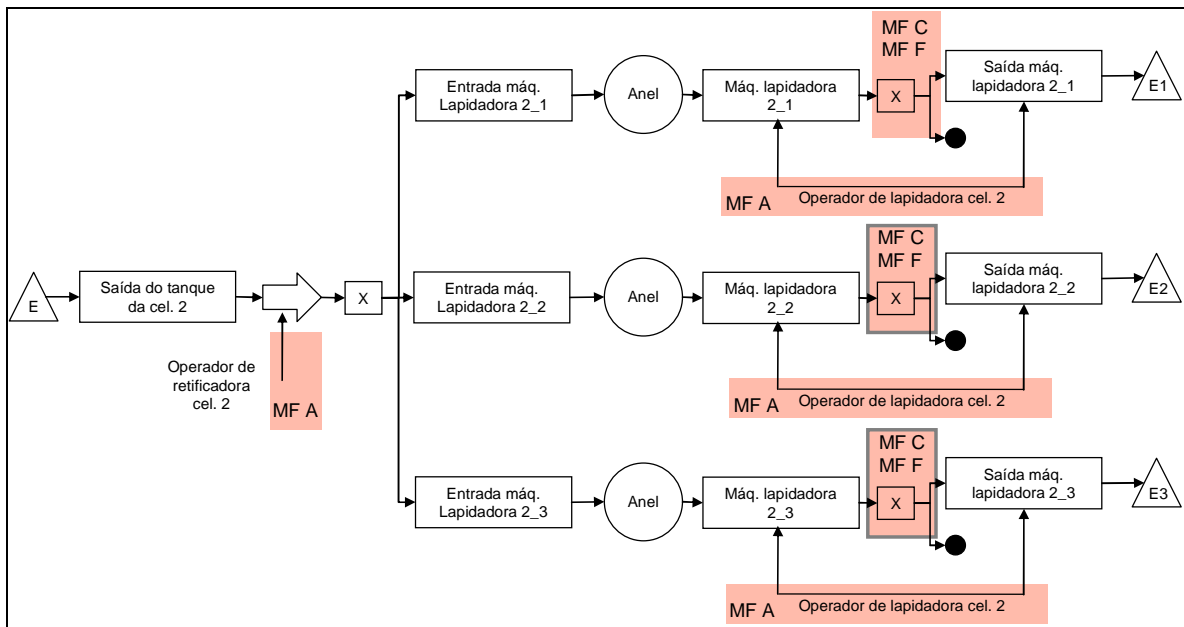


Figura 6.73 – Terceira parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo.

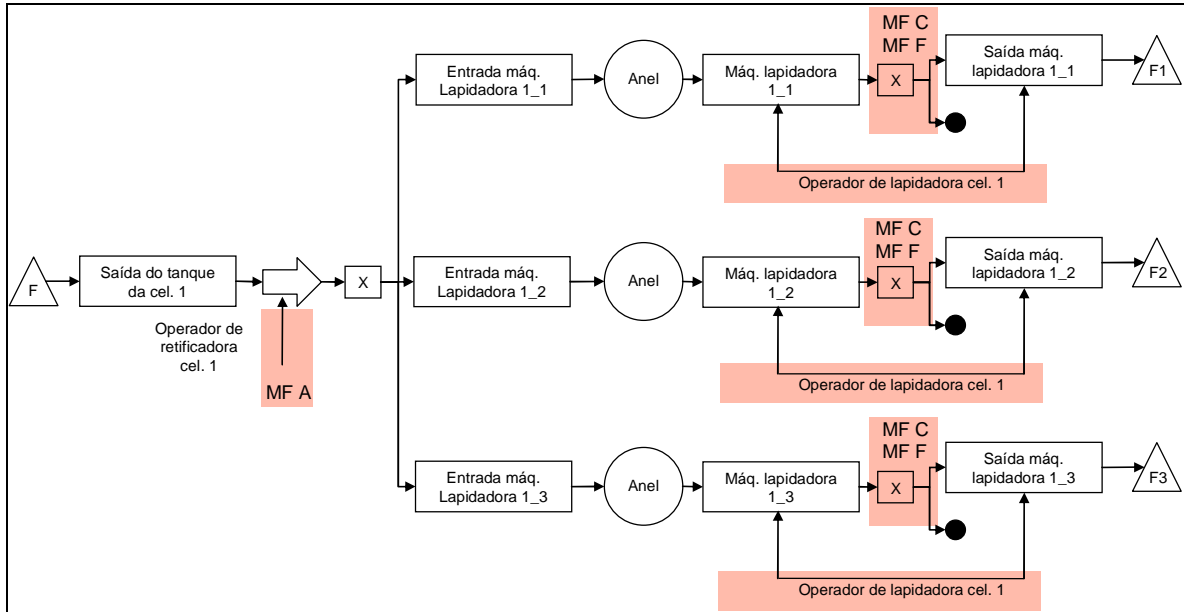


Figura 6.74 – Quarta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) no cenário 4 do segundo objeto de estudo.

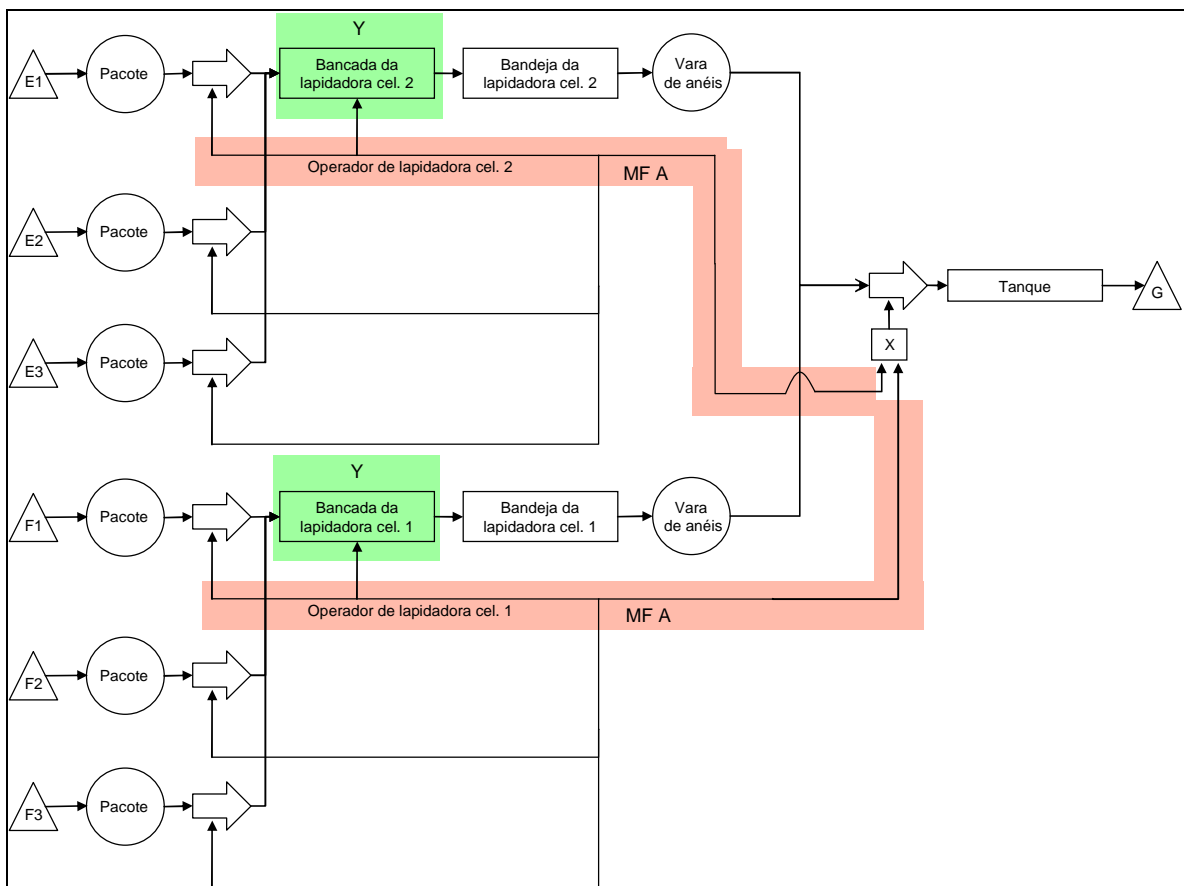


Figura 6.75 – Quinta parte da programação dos efeitos dos modos de falha (MF) e posição da variável de resposta Y no cenário 4 do segundo objeto de estudo.

Na Figura 6.75 pode-se notar que a variável de resposta está posicionada no final da célula 1 e 2, onde a quantidade de peças produzidas é somada. Foi gerada assim uma matriz experimental com seis fatores, gerando 64 experimentos, replicados 10 vezes cada um. As informações sobre os fatores e os níveis estão representadas na Tabela 6.35.

Tabela 6.35 - Níveis e fatores considerados no projeto experimental

Fator	Nível -	Nível +
A: (Modo de falha A)	Modo de falha não ocorre	Paralisação dos operadores de retificadora das células 1 e 2 e dos operadores de lapidadora das células 1 e 2, 4 vezes cada um, em 18 turnos simulados.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $B(0,8991; 1,4034; 20; 240)$ min
B: (Modo de falha B)	Modo de falha não ocorre	0,494% das peças produzidas pela retificadoras das células 1 e 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pelas células.  12 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.
C: (Modo de falha C)	Modo de falha não ocorre	0,685% das peças produzidas pelas lapidadoras das células 1 e 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pelas células.  9 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.
D: (Modo de falha D)	Modo de falha não ocorre	Paralisação das máquinas retificadoras das células 1 e 2, uma vez em 18 turnos.  Ocorrência aleatória, com tempo de paralisação de $N(231.9, 123.9)$ min.
E: (Modo de falha E)	Modo de falha não ocorre	23,33% das peças produzidas pelas retificadoras das células 1 e 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pelas células.  1 dos 18 turnos simulados foi afetado por este modo de falha.
F: (Modo de falha F)	Modo de falha não ocorre	15,06% das peças produzidas pelas lapidadoras das células 1 e 2 são desviadas para fora do fluxo, e não contabilizadas no número de peças produzidas pelas células.  5 dos 18 turnos simulados foram afetados por este modo de falha.

Os 640 dados obtidos no experimento estão representados na Tabela 6.36. Nesta simulação, cada um dos 64 experimentos, com suas 10 réplicas, demandou 5 minutos de tempo de processamento, totalizando 5 horas e 19 minutos. Este tempo foi superior ao demandado no cenário anterior pelo fato da simulação considerar mais uma célula. Vale lembrar novamente que não se pode considerar este tempo como o tempo total gasto no preenchimento da matriz experimental, pois entre cada experimento foi realizada a programação referente ao próximo experimento.

Tabela 6.36 - Resultados replicados na matriz experimental com precisão relativa

Exp	MF A	MF B	MF C	MF D	MF E	MF F	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	h/média
1	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	6036	6026	5989	6118	6038	6122	6092	5910	6012	6030	0.749096
2	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	5440	5384	5514	5517	5400	5519	5450	5338	5568	5499	0.950478
3	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	5875	5779	5748	5994	6080	5973	5821	5992	5882	5700	1.501358
4	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	5479	5680	5560	5596	5457	5522	5691	5579	5548	5601	0.978619
5	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	6000	5914	5852	6006	5932	6071	6017	6014	5914	5914	0.785759
6	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	5378	5338	5186	5262	5432	5527	5342	5356	5546	5446	1.478586
7	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	6027	5804	5858	5948	6008	5918	5925	6011	5922	5850	0.898614
8	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	5387	5576	5525	5615	5258	5411	5327	5274	5430	5324	1.644126
9	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	5632	5560	5612	5692	5696	5855	5830	5681	5896	5841	1.457796
10	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	5574	5417	5334	5472	5378	5323	5394	5490	5409	5488	1.026429
11	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	5851	5971	5880	5780	5938	5894	5810	5908	5980	5770	0.910129
12	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	5292	5434	5564	5364	5482	5324	5446	5478	5459	5376	1.084936
13	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	5886	5801	5925	5850	5876	5786	5898	6058	5800	5954	1.006773
14	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	5418	5440	5328	5501	5280	5408	5314	5314	5367	5296	0.965572
15	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	5598	5642	5592	5646	5664	5830	5820	5794	5654	5578	1.211324
16	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	5330	5370	5130	5238	5460	5378	5294	5404	5296	5327	1.239293
17	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	6040	6042	6050	5779	5966	6028	6020	6012	5960	5968	0.95828
18	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	5512	5490	5462	5478	5696	5492	5704	5528	5644	5444	1.264824
19	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	5844	6036	5965	6044	6038	5816	5924	6000	5994	5938	0.959885
20	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	5454	5331	5358	5326	5466	5374	5372	5342	5318	5438	0.73299
21	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	5974	5964	5968	5826	6020	5984	5994	5922	5916	5930	0.655513
22	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	5502	5452	5434	5416	5444	5490	5406	5574	5344	5590	0.9901
23	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	5954	5943	5888	5912	5920	5980	6006	5936	5833	5980	0.607175
24	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	5554	5543	5580	5600	5450	5390	5600	5480	5480	5560	0.910273
25	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	5898	5764	5882	5878	5899	5826	5896	5812	5889	5875	0.556849
26	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	5492	5374	5412	5288	5398	5490	5348	5496	5337	5334	0.987822
27	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	5807	5750	5682	5906	5908	5868	5737	5868	5856	5826	0.933946
28	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	5224	5140	5266	5362	5234	5218	5402	5307	5308	5548	1.560466
29	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	5864	5736	5840	5816	5748	5766	5774	5827	5773	5778	0.518899
30	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	5236	5302	5140	5337	5302	5152	5318	5104	5246	5182	1.135419
31	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	5522	5578	5481	5550	5458	5646	5702	5591	5792	5778	1.492852
32	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	5279	5312	5260	5249	5320	5311	5289	5299	5310	5292	0.317314
33	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	5928	5670	5924	5914	5892	5856	5938	5900	5992	5866	1.04005
34	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	5410	5366	5462	5524	5326	5324	5382	5356	5326	5450	0.899032
35	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	5642	5688	5554	5794	5676	5788	5708	5756	5642	5536	1.11609
36	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	5300	5192	5148	5505	5486	5476	5423	5430	5326	5459	1.686965
37	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	5804	5854	5880	5920	5851	5878	5810	5828	5858	5875	0.429644
38	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	5336	5349	5155	5524	5188	5103	5216	5310	5280	5232	1.623826
39	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	5832	5804	5824	5838	5834	5804	5844	5843	5792	5736	0.407549
40	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	5333	5322	5290	5290	5349	5356	5327	5288	5181	5320	0.672467
41	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	5770	5744	5718	5648	5642	5750	5622	5828	5822	5658	0.938323
42	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	5385	5154	5300	5246	5146	5388	5412	5246	5304	5378	1.306123
43	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	5657	5686	5670	5616	5736	5506	5650	5671	5638	5538	0.870438
44	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	5065	5283	5288	5226	5272	5003	5112	5314	5158	5378	1.653307
45	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	5630	5704	5566	5682	5706	5676	5666	5573	5642	5764	0.767529
46	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	5148	5212	5122	4954	5356	5324	5256	5261	5012	5016	1.922009
47	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	5494	5603	5518	5504	5554	5646	5500	5626	5602	5558	0.720191
48	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	5096	5152	5252	4989	5101	5322	4976	5022	5048	5295	1.759004
49	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	5850	5770	5758	5867	5862	5827	5756	5763	5832	5794	0.5498
50	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	5475	5427	5350	5376	5416	5362	5319	5420	5420	5430	0.614336
51	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	5624	5596	5476	5774	5660	5446	5590	5600	5630	5575	1.166398
52	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	5231	5232	5237	5294	5373	5148	5438	5361	5200	5450	1.400552
53	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	5686	5780	5780	5730	5774	5751	5720	5762	5832	5764	0.493247
54	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	5310	5198	5343	5288	5328	5350	5353	5274	5380	5276	0.712778
55	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	5764	5598	5734	5718	5784	5730	5756	5779	5788	5720	0.691001
56	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	5277	5329	5238	5324	5020	5234	5230	5245	5300	5256	1.188552
57	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	5742	5692	5610	5652	5612	5664	5685	5692	5621	5661	0.527203
58	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	5100	5098	5114	5360	5152	5032	5358	5182	5214	5096	1.539033
59	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	5586	5618	5700	5682	5504	5631	5654	5628	5584	5714	0.795129
60	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	5199	5192	5148	5184	5208	5304	5073	5250	5194	5076	0.97492
61	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	5418	5464	5518	5580	5470	5634	5541	5580	5580	5532	0.851085
62	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	5116	5088	5162	5123	5244	5220	5196	4975	5200	5258	1.213702
63	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	5614	5366	5521	5594	5558	5576	5634	5657	5592	5592	1.090599
64	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	5019	4980	5277	5152	5063	5151	5126	5154	5217	5190	1.258432

As verificações de normalidade dos resíduos e independência estão representadas nas Figuras 6.76 e 6.77.

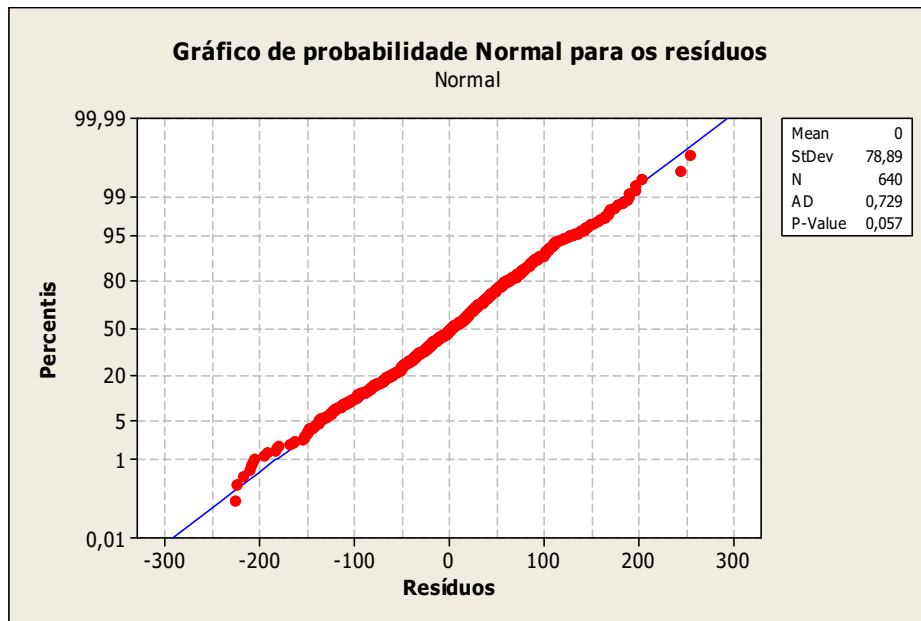


Figura 6.76 – Teste de normalidade para os resíduos do cenário 4, referente ao segundo objeto de estudo

A Figura 6.76 mostra o teste de normalidade dos resíduos provenientes do cenário 4. O valor de *p-value* superior a 0,05 não rejeita a hipótese de normalidade.

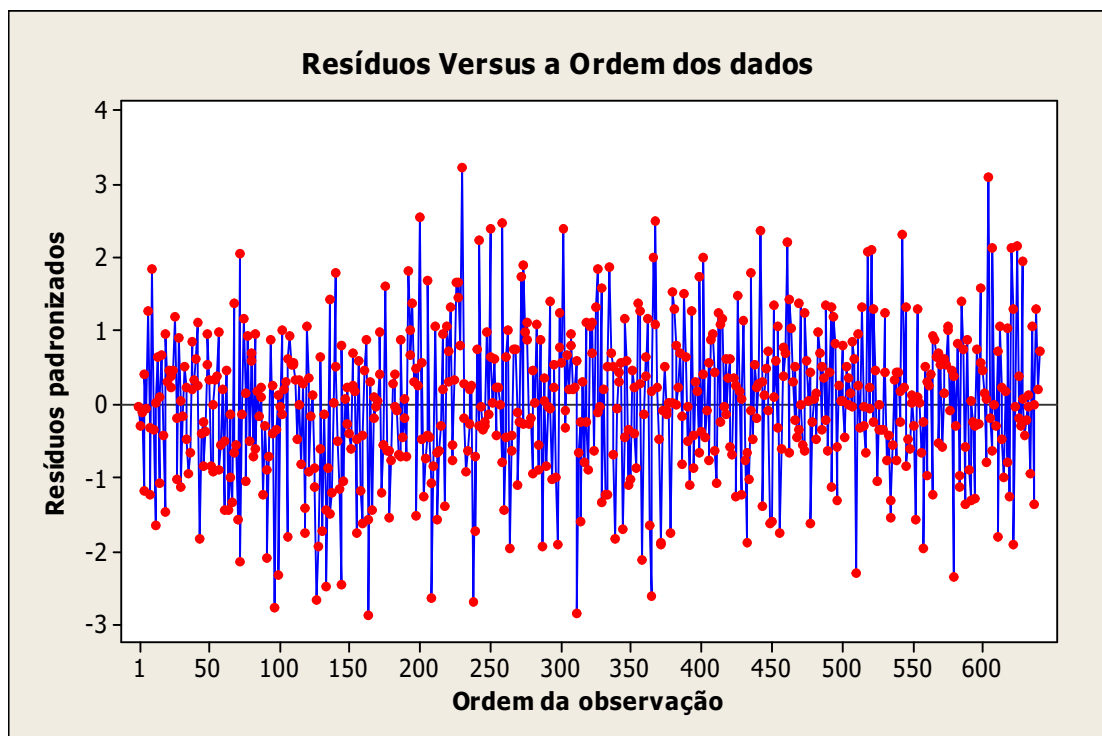


Figura 6.77 – Aleatoriedade dos resíduos do cenário 4, referente ao segundo objeto de estudo

A independência dos resíduos pode ser verificada na aleatoriedade dos pontos observados, como mostra a Figura 6.77. A Figura 6.78 mostra os efeitos principais dos modos de falha.

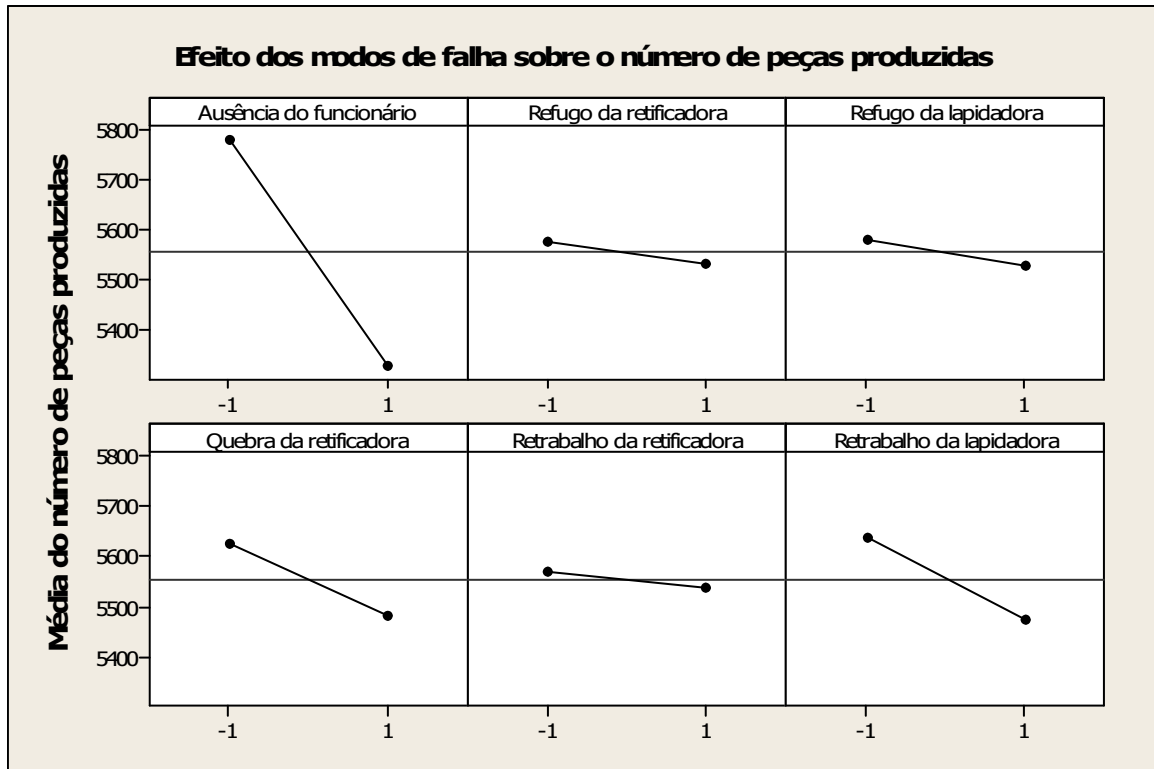


Figura 6.78 – Efeito dos modos de falha (MF) sobre o número de peças produzidas pelas células 1 e 2.

Assim como no cenário anterior, os modos de falha A (ausência do funcionário), F (retrabalho da lapidadora) e D (quebra da retificadora) causaram os maiores efeitos negativos no número de peças produzidas. A Figura 6.79 mostra a ordenação gerada a partir da importância dos efeitos.

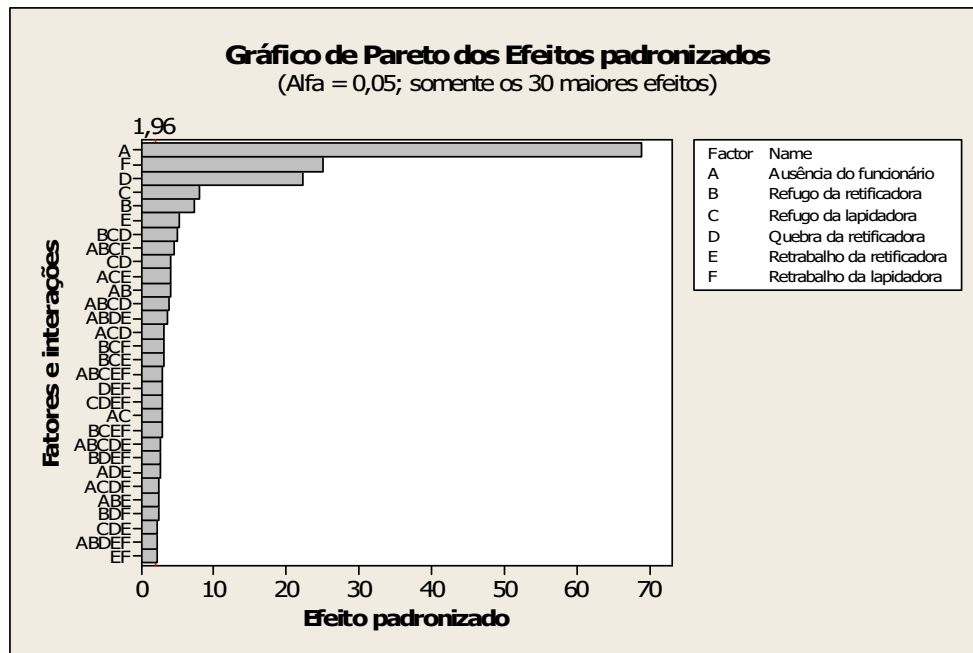


Figura 6.79 – Ordenação dos modos de falha e interações mais impactantes no número de peças produzidas pelas células 1 e 2.

Semelhante ao cenário anterior, observa-se que as interações não apresentaram efeitos importantes sobre a variável de resposta. Tal constatação pode ser observada também na Figura 6.80.

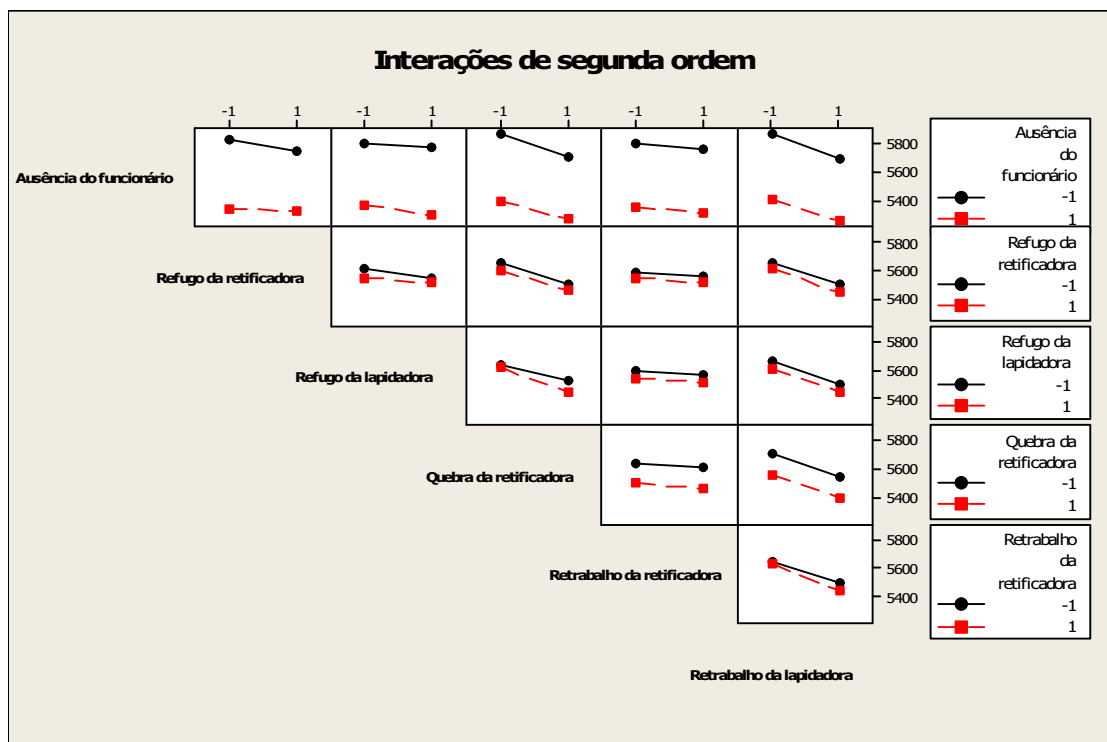


Figura 6.80 - Efeitos das interações de segunda ordem sobre o número de peças produzidas pelas células 1 e 2.

### 6.4.9 Síntese dos resultados do segundo objeto de estudo

A Figura 6.81 sintetiza os resultados encontrados nos cenários do segundo objeto de estudo.

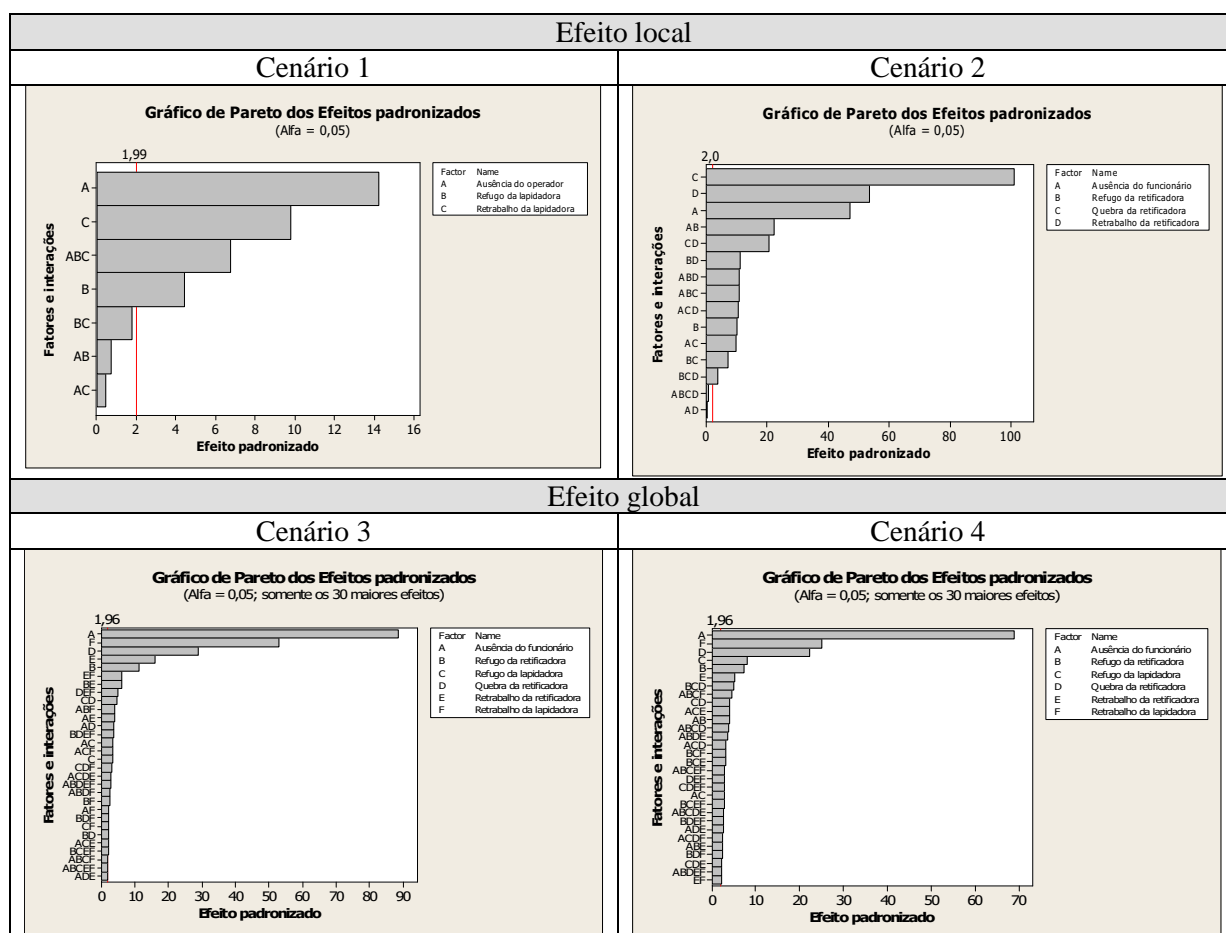


Figura 6.81 – Efeitos dos modos de falha e interações dos quatro cenários analisados no segundo objeto de estudo.

Os cenários 3 e 4 apresentaram resultados semelhantes. Esta constatação já era esperada, devido ao fato de que as diferenças entre os cenários 3 e 4 resumem-se a inserção de mais uma célula no cenário 4, de mesma configuração com a já encontrada no cenário 3. Embora com resultados semelhantes ao cenário 3, o cenário 4 destaca a possibilidade de compreender os efeitos dos modos de falha sobre sistemas mais abrangentes. Esta possibilidade permite a tomada de decisões focada em uma visão mais macro do sistema. As conclusões obtidas nesta tese estão registradas no capítulo a seguir.

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Este capítulo encerra o trabalho apresentado nesta tese. Serão apresentadas as conclusões obtidas com os objetivos propostos e algumas considerações finais sobre a aplicação do método proposto, destinadas sobretudo a pesquisadores e empresas interessadas na aplicação do método. O capítulo se encerra com a citação dos artigos originados a partir desta tese até o momento da sua redação final e com a proposta de temas para futuros desdobramentos deste tema.

### 7.1 CONCLUSÕES DOS OBJETIVOS PROPOSTOS

Este trabalho iniciou com a proposta de um objetivo principal e dois objetivos específicos. As conclusões serão apresentadas de acordo com os objetivos apresentados, começando com os objetivos específicos.

Conforme apresentado no Capítulo 1, o primeiro objetivo específico foi:

- Desenvolver uma técnica de modelagem conceitual, que permita a representação do sistema a ser simulado, através de uma lógica próxima a utilizada em simulação. Esta técnica deverá ser utilizada na modelagem conceitual dos objetos de estudo deste trabalho, incluindo a representação das falhas.

O Capítulo 6 apresentou a técnica de modelagem desenvolvida, chamada de IDEF-SIM. A técnica foi criada utilizando-se elementos de modelagem já utilizados em outras técnicas de modelagem de processos. Porém, estes elementos tiveram suas lógicas direcionadas aos objetivos da simulação.

Todos os modelos gerados neste trabalho foram representados em IDEF-SIM. A técnica de modelagem permitiu a representação do modelo conceitual através de uma lógica semelhante à utilizada na programação da simulação, porém mantendo um aspecto visual de fácil entendimento.

A possibilidade de representação dos recursos necessários em cada local de trabalho demonstrou a grande participação do recurso humano nos objetos de estudo, o que auxilia na justificativa do efeito do modo de falha “ausência do funcionário”, aparecendo em diversos cenários como modo de falha de maior impacto na produção.

A técnica ainda se mostrou eficaz na representação dos modos de falha programados. Os exatos locais de ação dos modos de falha foram registrados no IDEF-SIM através da sinalização dos locais afetados, recursos e alteração da direção do fluxo.

Outra vantagem observada no uso da técnica IDEF-SIM foi a possibilidade de melhorar o processo de validação face-a-face com os especialistas do processo, uma vez que a lógica do IDEF-SIM é semelhante a utilizada no processo de modelagem computacional. Tal constatação foi obtida comparando-se com a técnica tradicional utilizada previamente: o fluxograma. Nesta validação incluem-se os modos de falha programados.

A proposta desta técnica de modelagem conceitual foi publicada no trabalho de Leal, Almeida e Montevechi (2008). Considera-se este artigo citado como um dos resultados desta tese.

Desta forma, admite-se como concluído o primeiro objetivo específico proposto no trabalho.

Ainda conforme apresentado no Capítulo 1, o segundo objetivo específico deste trabalho foi:

- Construir um fluxograma que represente uma seqüência de etapas para a validação estatística de modelos de simulação. Este fluxograma deverá ser construído a partir da revisão da literatura. Uma vez construído, este fluxograma deverá ser utilizado na fase de validação dos modelos deste trabalho e poderá ser utilizado para orientar trabalhos de simulação, no que concerne à validação estatística de modelos.

Após revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 sobre simulação a eventos discretos, construiu-se um fluxograma com o objetivo de orientar a validação

estatística de modelos de simulação. Este objetivo específico foi motivado após análise de diversos trabalhos, sendo vários deles referenciados no próprio Capítulo 2, onde a validação do modelo de simulação em geral se mostrou pouco detalhada nos trabalhos.

Os passos apresentados no fluxograma foram utilizados na validação dos dois modelos de simulação apresentados no Capítulo 6. O modelo computacional do primeiro objeto de estudo, após análise dos dados gerados, foi validado através técnicas próprias para dados normais, enquanto o modelo do segundo objeto de estudo foi validado através de técnicas não-paramétricas. Ambas as situações foram previstas no fluxograma apresentado.

O fluxograma desenvolvido neste trabalho foi aplicado também no trabalho de Montevechi *et al.* (2008).

Desta forma, admite-se como concluído o segundo objetivo específico proposto no trabalho.

Por fim, apresentam-se agora as conclusões referentes ao objetivo principal deste trabalho, ou seja:

- Analisar o efeito interativo de falhas em processos, de forma quantitativa, através de projeto de experimentos simulados.

Conforme mostra a literatura citada no Capítulo 5, a FMEA ainda apresenta-se como principal técnica para avaliar e hierarquizar efeitos dos modos de falha. Sobretudo devido a sua facilidade de uso, esta técnica apresenta-se em diversos trabalhos publicados, como demonstram os tópicos do Capítulo 5. Diversos trabalhos propondo melhorias na FMEA também são citados no Capítulo 5, sendo vários deles discutindo a subjetividade atribuída aos fatores da técnica, sobretudo a questão da gravidade dos efeitos.

Motivado por este aspecto, o método apresentado neste trabalho, combinando a simulação a eventos discretos e o projeto de experimentos (DOE), hierarquizou os modos de falha encontrados nos objetos de estudo através da intensidade dos efeitos. Ao contrário da técnica FMEA, esta hierarquização dos modos de falha foi realizada a partir da mensuração da variável de resposta “número de peças produzidas”. Através da simulação computacional, os modos de falha foram tratados como fatores

controláveis e analisados segundo a técnica do DOE. A realização destes experimentos não seria possível em ambiente real. Além da questão do custo do experimento, não seria prático “forçar” uma situação de falha em células de produção.

Analisando as figuras apresentadas no Capítulo 6, concluíram-se alguns pontos relevantes. Em algumas situações, os efeitos de diferentes modos de falha podem interagir. Esta situação não é facilmente identificada por especialistas do processo e na maioria das vezes passa a ser então ignorada. Em alguns casos, como visto neste trabalho, ignorar o efeito da interação não prejudica a análise convencional de falhas, uma vez que o efeito da interação não é significativo. Porém, este trabalho mostrou que algumas interações são significativas, justificando seu reconhecimento no auxílio ao processo de tomada de decisões.

Uma vez que se é conhecido o efeito significativo e indesejável da interação de modos de falha, políticas de prevenção de falhas podem ser orientadas, uma vez que, estando o sistema sob efeito de um modo de falha, deseja-se evitar naquele momento a ocorrência de outro modo de falha cuja interação possa incrementar ainda mais o efeito negativo sobre a produção.

Independente da questão da interação, o método descrito neste trabalho hierarquizou os efeitos principais dos modos de falha, de acordo com a queda no número de peças produzidas. Esta hierarquização dos efeitos não sofre a grande parcela de subjetividade encontrada na definição de gravidade da técnica FMEA.

Além até do proposto no objetivo principal deste trabalho, a análise dos efeitos dos modos de falha foi apresentado segundo cenários projetados. Os resultados obtidos permitem concluir que uma hierarquização de modos de falha necessita de uma definição prévia dos limites do sistema estudado. Ou seja, um modo de falha considerado grave em um posto de trabalho pode não ter o mesmo efeito significativo sobre um subprocesso ou processo.

Os resultados desta análise podem ser utilizados não somente no processo de tomada de decisões, mas também no treinamento de equipes. Além das equipes de manutenção que podem visualizar através da animação da simulação os impactos de um modo de falha, os próprios funcionários envolvidos na produção podem compreender melhor os efeitos dos modos de falha. Como visto no Capítulo 6, os

modos de falha originados da decisão do funcionário apresentaram grande impacto na produção.

É importante salientar que modos de falha que colocam em risco a vida de pessoas e a integridade do meio ambiente devem ser priorizados acima de tudo. Segurança e meio ambiente são itens considerados prioritários na maioria das empresas, e esta importância se projeta nos modos de falha.

Porém, abaixo desta categoria de priorização, estão as falhas que afetam a produção. Neste caso, o método proposto neste trabalho se aplica.

## 7.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO PRÁTICA DESTA PROPOSTA

As principais limitações deste trabalho são características de qualquer projeto de simulação. Os resultados encontrados dependem da qualidade dos dados de entrada. Desta forma, recomenda-se para a aplicação dos passos descritos neste trabalho um banco de dados confiável, tanto no registro dos dados do processo como no registro das ocorrências de falhas.

Neste trabalho, os tempos médios entre falhas foram definidos a partir do intervalo de tempo definido nesta análise. Sugere-se a pesquisadores ou mesmo a empresas que desejem utilizar o método proposto e que possuam um banco de dados mais extenso, que utilizem o tempo médio entre falhas baseado em dados históricos e com projeções para o futuro, levando-se em consideração aspectos como a sazonalidade. Sugere-se a análise do trabalho de Almeida, Leal e Almeida (2005).

No registro dos efeitos dos modos de falha em bancos de dados, deve-se atentar à possibilidade de registrar o efeito do modo de falha juntamente com o efeito de algum fator não considerado. Neste caso indesejado, o efeito simulado do modo de falha pode ser alterado.

Pode-se imaginar uma situação onde ocorra o registro em banco de dados do número de peças produzidas por uma célula, sob efeito de determinada falha, em um determinado dia. Porém, coincidentemente, neste mesmo dia, fatores externos que tenham causado desmotivação nos funcionários, ou mesmo queda de rendimento nas

máquinas podem ter ocorrido, agravando os efeitos no número de peças produzidas. Atribuir esta somatória de efeitos ao modo de falha pode levar a decisões mal dimensionadas. Sugere-se neste caso um cuidado especial aos responsáveis pelo registro no banco de dados.

### 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O assunto apresentado neste trabalho ainda permite novos avanços. Alguns desdobramentos já podem ser apontados:

- análise do efeito dos modos de falha sobre outras variáveis de resposta, como *lead time*, porcentagem de itens em atraso, custo da produção. No caso da variável custo, modos de falha como refugo e retrabalho podem ter efeitos completamente diferentes entre si;
- análise de políticas de prevenção de falhas, através dos resultados dos experimentos simulados. Esta análise de viabilidade de políticas de prevenção de falhas pode ser feita através de técnicas de análise econômica, aplicadas nos cenários simulados. Para diminuir o número de cenários avaliados economicamente, apenas aqueles com efeito significativo seriam considerados. Neste caso sugere-se a aplicação do DOE;
- uso da técnica de mapeamento IDEF-SIM na confecção de modelos conceituais para projetos de simulação em sistemas de serviço.
- na área de ensino de engenharia de produção, trabalhos podem ser desenvolvidos analisando o uso da simulação como um instrumento didático. Duas abordagens podem ser definidas: a primeira, focando a simulação como instrumento de ensino para outras disciplinas, como planejamento e controle da produção, custos, qualidade, estatística, racionalização industrial, gestão da manutenção, entre outras; e a segunda avaliando técnicas de ensino em simulação. Neste último caso, a disciplina de simulação é analisada sob o enfoque acadêmico, buscando-se formas de recriar processos em sala de aula

para que os alunos possam modelá-los conceitualmente e computacionalmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULMALEK, F.A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v. 107, p. 223–236, 2007.

AGUIAR, D.C. de; SALOMON, V.A.P. Aplicação da prevenção de falhas em processos utilizando métodos de tomada de decisão. **Revista Produção**, v.17, n.3, p.502-519, 2007.

AGUILAR-SAVÉN, R.S. Business process modeling: Review and framework. **International Journal of Production Economics**, v.90, p.129–149, 2004.

AL-AHMARI, A.M.A.; RIDGWAY, K. An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design. **Computers in Industry**, v.38, n.3, p. 225–238, 1999.

AL-ZUBAIDI, H.; CHRISTER, A.H. Maintenance manpower modeling for a hospital building complex. **European Journal of Operations Research**, v.99, p. 603-618, 1997.

ALBINO, V., CARELLA, G.; OKOGBAA, O. Maintenance policies in just-in-time manufacturing lines. **International Journal of Production Research**, v.30, n.2, p. 369-382, 1992.

ALMEIDA FILHO, R.G. de. **Planejamentos fatoriais fracionados para análise de sensibilidade de modelos de simulação de eventos discretos**. 2006. 144 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2006.

ALMEIDA, D.A. de; LEAL, F.; ALMEIDA, R.A. de. Análise de falhas em uma empresa brasileira de energia elétrica através do indicador de sazonalidade aplicado na abordagem FMEA. In: **VI CLAGTEE**, Mar del Plata, Argentina, 2005.

ALMEIDA, D.A. de; LEAL, F.; PINHO, A.F. de; FAGUNDES, L.D. Gestão do Conhecimento na análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação. **Revista Produção**, v.16, n.1, p.171-186, 2006.

ALTER, STEVEN. **Information system: a management perspective**. 3.ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman, 1999. 523 p.

ANDIJANI, A.; DUFFUAA, S. Critical evaluation of simulation studies in maintenance systems. **Production Planning and Control**, v.13, n.4, p. 336-341, 2002.

BAINES, T.; MASON, S.; PEER-OLAF, S.; LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation? **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.12, p.515–526, 2004.

BALCI, O. Verification, validation and accreditation of simulation models. In: **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference**, Atlanta, GA, USA.

BALCI, O. Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications. In: **Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference**, New Orleans, Louisiana, USA.

BANKS, J. **Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998. 864p.

BANKS, J., J. S. CARSON, B. L. NELSON, D. M. NICOL. **Discrete-event Simulation**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2005.

BARNES, R. M. **Estudo de movimentos e de tempos**. 6.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

BARNETT, K.; BLUNDELL, J. Trade demarcations in maintenance determination of optimum crew sizes by the Monte Carlo simulation technique. **Terotechnology**, v.2, p. 147-155, 1981.

BARROS, A. de J. P. de; LEHFELD, N. A. de S. **Projeto de pesquisa: propostas metodológicas**. Petrópolis: Vozes, 1999.

BARTON, R.R. Designing simulation experiments. In: **Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference**, San Diego, California, USA.

BEN-DAYA, M.; RAOUF, A. A revised failure mode and effects analysis model. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.3, n.1, p. 43–47, 1993.

BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M.; MASSINI, R. FMECA approach to product traceability in the food industry. **Food Control**, v.17, p. 137–145, 2006.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BESTORY, C.; MARC, F.; LEVI, H. Statistical analysis during the reliability simulation. **Microelectronics Reliability**, v. 47, p.1353–1357, 2007.

BISGAARD, S.; FULLER, H. Analysis of Factorial Experiments with defects or defectives as the response. **Report n. 119**, Center for Quality and Productivity Improvement University of Wisconsin, 1994.

BLANKS, H.S. **Reliability in procurement and use: from specification to replacement**. New York: Wiley; 1992. 368p.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML – Guia do Usuário**. Elsevier Editora LTDA, 2005, 474p.

BOSIL, J.; GIAGLIS, G.; HLUPIC, V. IDEF diagrams and Petri Nets for Business Process Modelling. In: **Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference**, Orlando, FL, USA.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building**. New York: Wiley, 1978.

BOX, G. E. P., DRAPER, R. **Empirical Model-Building with Response Surfaces**. New York: Wiley, 1987.

BRAGLIA, M. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 17, n. 9, p. 1017-1033, 2000.

BRANCO FILHO, G. **Dicionário de termos de manutenção, confiabilidade e qualidade**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 1996. 274p.

CARINO, C. Structural layout assessment by orthogonal array based simulation. **Mechanics Research Communications**, v.33, p. 292–301, 2006.

CARNAGHAN, C. Business process modeling approaches in the context of process level audit risk assessment: an analysis and comparison. **International Journal of Accounting Information Systems**, v.7, n.2, p. 170–204, 2006.

CAYRAC, D.; DUBOIS, D.; PRADE, H. Handling uncertainty with possibility theory and fuzzy sets in a satellite fault diagnosis application. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v.4, n.3, p. 251-269, 1996.

CHUNG, C.A. **Simulation Modeling Handbook: a practical approach**. Washington D.C: CRC press, 2004. 608p.

CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. 1999. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CHWIF, L.; PAUL, R.J.; BARRETTO, M.R.P. Combining the best of the two: an activity cycle diagram/condition specification approach. In: **Proceedings of the Fourth National Conference of the UK Simulation Society**, Nottingham Trent University, Nottingham, UK, 1999, pp. 93–98.

CHWIF, L.; PAUL, R.J.; BARRETTO, M.R.P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.14, p. 930–944, 2006.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006. 254p.

COX, D.R.; OAKES, D. **Analysis of survival data**. London: Chapman & Hall, 1984. p. 91–113.

COX, D.R.; REID, N. **The Theory of the Design of Experiments**. Chapman & Hall/CRC, 2000. 323p.

DESSOUKY, Y.M.; BAYER, A. A simulation and design of experiments modeling approach to minimize building maintenance costs. **Computers & Industrial Engineering**, v.43, p.423-436, 2002.

DEVORE, J. **Probability and statistics for engineering and the sciences**. 5.ed. Pacific Grove: Duxbury Press, 2000.

DUFFUAA, S.O.; BEN-DAYA, M.; AL-SULTAN, K.S.; ANDIJANI, A.A. A generic conceptual simulation model for maintenance systems. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.7, n. 3, p. 207-219, 2001.

EBELING, C.E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. New York: McGraw-Hill, 1997, 486p.

EKREN, B.Y.; ORNEK, A.M. A simulation based experimental design to analyze factors affecting production flow time. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.16, p.278-293, 2008.

FAGUNDES, L.D. **Mapeamento de falhas em concessionária do setor elétrico: gestão do conhecimento auxiliando a gestão da manutenção**. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.

FÜLSCHER, J.; POWELL, S.G. Anatomy of a process mapping workshop. **Business Process Management Journal**, v.5, n.3, p.208-237, 1999.

GARRICK, B.J. The approach to risk analysis in three industries: nuclear power, space systems, and chemical process. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 23, n.3, p. 195-205, 1988.

GILCHRIST, W. Modelling failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v.10, n.5, p.16–23, 1993.

GREASLEY, A. Using business-process simulation within a business-process reengineering approach. **Business Process Management Journal**, v.9, n.4, p. 408-420, 2003.

GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. **Technovation**, v.26, p. 95–103, 2006.

HARREL, C.; TUMAY, K. **Simulation Made Easy**. Engineering & Management press, 1997, 311p.

HARRELL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using Promodel**. 3.ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 603 p.

HERNANDEZ-MATIAS, J.C.; VIZAN, A.; PEREZ-GARCIA, J.; RIOS, J. An integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v.24, n.2, p.187-199, 2008.

HOWARD, L.; LEWIS, H. The development of a database system to optimise manufacturing processes during design. **Journal of Mater Process Technology**, v.34, p.374–382, 2003.

HSIU-JU, R.Y.; GWINNER, K.P.; SU, W. The impact of customer participation and service expectation on locus attributions following service failure. **International Journal of Service Industry Management**, v.15, n.1, p. 7-26, 2004.

HUSSAIN, O.K.; CHANG, E.; HUSSAIN, F.K.; DILLON, T.S. A methodology to quantify failure for risk-based decision support system in digital business ecosystems. **Data & Knowledge Engineering**, v. 63, p. 597–621, 2007.

JOO, S.J.; LEVARY, R.R.; FERRIS, M.E. Planning preventive maintenance for a fleet of police vehicles using simulation. **Simulation**, v. 68, p. 93-100, 1997.

KALPIČ, B.; BERNUS, P. Business process modeling through the knowledge management perspective. **Journal of Knowledge Management**, v.10, n.3, p. 40-56, 2006.

KARA-ZAITRI, C.; KELLER, A.Z.; FLEMING, P.V. A smart failure mode and effect analysis package. In: **Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium**, p. 414–421, 1992.

KARA-ZAITRI, C. An improved minimal cut set algorithm. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.13, n.2, p. 114-132, 1996.

KELTON, W.D. A tutorial on design and analysis of simulation experiments. In: **Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference**, Arlington, VA, USA .

KELTON, W.D. Designing simulation experiments. In: **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**, Phoenix, AZ, USA.

KENNE, J.P.; GARBI, A. Experimental design in production: a maintenance control problem of a single machine, single product manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, v. 37, p. 621-37, 1999.

KETTINGER, W.J.; TENG, J.T.C.; GUHA, S. Business process change: a study of methodologies, techniques, and tools. **MIS Quarterly**, v.21, n.1, p.55–80, 1997.

KIESELBACH, R. Systematic failure analysis using fault tree and fuzzy logic. **Technology, Law and Insurance**, v.2, n.1, p.13-20, 1997.

KIM, C.; WESTON, R.; HODGSON, A.; LEE, K. The complementary use of IDEF and UML modelling approaches. **Computer in Industry**, v.50, p.35–56, 2003.

KLASSEN, K.J.; ROHLEDER, T.R. Scheduling outpatient appointments in a dynamic environment. **Journal of Operations Management**, v.14, p. 83–101, 1996.

KLEIJNEN, J.P.C. Theory and Methodology: Verification and validation of simulation models. **European Journal of Operational Research**, v.82, p.145-162, 1995.

KLEIJNEN, J.P.C. Experimental Design for Sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models. In: BANKS, J. **The Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. John Wiley & Sons, Inc., 1998, cap. 6.

KLEIJNEN, J.P.C.; SANCHEZ, S.M.; LUCAS, T.W.; CIOPPA, T.M. State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **Journal on Computing**, v.17, n.3, p. 263–289, 2005.

KOUSKOURAS, K.G.; GEORGIU, A.C. A discrete event simulation model in the case of managing a software project. **European Journal of Operational Research**, v.181, p. 374-389, 2007.

KRAJEWSKI, L.J., KING, B.E., RITZMAN, L.P., WONG, D.S. Kanban, MRP, and shaping the manufacturing environment. **Management Science**, v.33, p.39–57, 1987.

KUMAR, S.; PHROMMATHED, P. Improving a manufacturing process by mapping and simulation of critical operations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.17, n.1, p. 104-132, 2006.

KUMAR, S.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v.23, p. 361–370, 2007.

LANDERS, T.L.; JIANG, S.T.; PECK, J.R. Semi-parametric PWP model robustness for log-linear increasing rates of occurrence of failure. **Reliability Engineering & System Safety**, v.73, n.2, p.145–153, 2001.

LANGE, K.A. **Potential Failure Mode and Effects Analysis: FMEA reference Manual**. 3.ed. Daimler Chrysler, Ford, General Motors, 2001. 76p.

LAUGHERY, R.; PLOTT, B.; SCOTT-NASH, S. Simulation of service systems. In: BANKS, J. **The Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998, cap 18.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 760 p.

LAW, A.M. How to build valid and credible simulation models. In: **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA.

LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 2003. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.

LEAL, F.; OLIVEIRA, M.L.M. de; ALMEIDA, D.A. de; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S.; MATOS, A.J. de M. Elaboração de modelos conceituais em simulação computacional através de adaptações na técnica IDEF0: uma aplicação prática. In: **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, PR, 2007.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. de; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S. Análise do efeito de múltiplas falhas em um processo através do projeto de experimentos simulados. In: **Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO**, Fortaleza, CE, Brasil, 2007.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: **Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, João Pessoa, PB, 2008.

LEE, B. Using Bayes belief networks in industrial FMEA modeling and analysis. In: **Proceedings of 2000 International Symposium on Product Quality and Integrity**, Philadelphia, PA, USA.

MA, Z.; ZHANG, W.; MA, W. Extending IDEF1X to model fuzzy data. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.13, n.4, p. 295–307, 2002.

MALHOTRA, M.K., RITZMAN, L.P. Scheduling flexibility in the service sector: a postal case study. **Production and Operations Management**, v.3, n.2, p. 100–117, 1994.

MARSEGUERRA, M.; ZIO, E.; PODOFILLINI, L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v.77, n.2, p. 151–165, 2002.

MÁRQUEZ, A.C. Modeling critical failures maintenance: a case study for mining. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.11, n.4, p. 301-317, 2005.

MAYER, R.J.; MENZEL, C.P.; PAINTER, M.K.; WITTE, P.S.; BLINN, T.; PERAKATH, B. **Information integration for concurrent engineering (IICE) IDEF3 process description capture method report**. Interim Technical Report for period, University Drive East College Station, Texas, 1995.

MING, D.; FRANK, C. Process modeling and analysis of manufacturing supply chain networks using object-oriented Petri nets. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v.17, n.1-2, p. 121–129, 2001.

MONTAGUE, D.F. Process risk evaluation: what method use?". **Reliability Engineering & System Safety**, v.29, p. 37-45, 1990.

MONTEVECHI, J.A.B.; PINHO, A.F. de; LEAL, F.; MARINS, F.A.S. Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: **Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA.

MONTEVECHI, J.A.B.; PINHO, A.F. de; LEAL, F.; MARINS, F.A.S.; COSTA, R. F. da S. Improving a process in a brazilian automotive plant applying process mapping, design of experiments and discrete events simulation. In: **Proceedings of the 20 Symposium Europeo de Modelado y Simulacion (SCS)**, Briatico, Itália, 2008.

MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.; PINHO, A.F. de; COSTA, R.F. da S.; MARINS, F.A.S.; MARINS, F.F.; JESUS, J.T. de. Combined use of modeling techniques for the development of the conceptual model in simulation projects. In: **Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference**, Miami, USA.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 6.ed. Wiley, 2005. 660p.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2.ed. Editora LTC, 2003. 476 p.

MOSLEH, A. Dependent failure analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v.34, n.3, p.243–248, 1991.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. São Paulo: Aladon Ltda, 2000. 426p.

MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments**. 2.ed. New York: Wiley, 2002. 824p.

NANCE, R.E. A Tutorial View of Simulation Model Development. In: **Proceedings of the 1983 Winter Simulation Conference**, Arlington, VA, USA.

NARMADA, S.; JACOB, M. Reliability analysis of a complex system with a deterioration standby unit under common-cause failure and critical human error. **Microelectron Reliability**, v.36, n.9, p.1287–1290, 1996.

NELSON, B. L.; YAMNITSKY, M. Input modeling tools for complex problems. In: **Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA.

NETHE, A.; STAHLMANN, H.D. Survey of a general theory of process modeling. In: **Proceedings of the 1999 International Conference on Process Modelling**, Cottbus, Germany, p. 2–16.

NIST. **Integration definition for functional modeling**. Federal Information Processing Standards Publications, FIPS PUB 183, NIST; 1993.

OR/MS TODAY. Institute for Operations Research and the Management Sciences, **Informs**, 2005. Disponível em: <<http://lionhrtpub.com/orms/>>. Acesso em: 14 set. 2007.

PAPAZOGLU, L.A. Semi-Markovian reliability model for systems with testable components and general test/outage times. **Reliability Engineering & System Safety**, v.68, n.1, p. 121–133, 2000.

PAPIC, L.; ARONOV, J. A fuzzy approach to ranking procedure of systems elements according to criticality degree. In: **Proceedings of 1996 Advanced Manufacturing Processes, Systems and Technologies**, Bradford, p. 291-297.

PELAEZ, C.E., BOWLES, J.B. Using fuzzy logic for system criticality analysis. In: **Proceedings of the 1994 IEEE Annual Reliability And Maintainability Symposium**, p. 449-455.

PELAEZ, C.E; BOWLES, J.B. Applying fuzzy cognitive-maps knowledge representation to failure modes effects analysis. **Journal of Information Science**, v.88, n.1, p.177–199, 1996.

PERCY, D.F. Bayesian enhanced strategic decision making for reliability. **European Journal of Operation Research**, v.139, n.1, p.133–145, 2002.

PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v.7, p. 645–656, 2000.

PIDD, M. Five Simple Principles of Modelling. In: **Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference**, Coronado, CA, USA.

PILLAY, A.; WANG, J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. **Reliability Engineering & System Safety**, v.9, p. 69–85, 2003.

PING, H.; YU-CHENG, L. Developing an activity-based knowledge management system for contractors. **Automation in Construction**, v.13, n.6, p.781–802, 2004.

PINHO, A.F. de; LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. de. A Integração entre o Mapeamento de Processo e o Mapeamento de Falhas: dois casos de aplicação no setor elétrico. In: **Anais do XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Fortaleza, CE, 2006.

POTTER, A.; YANG, B.; LALWANI, C. A simulation study of despatch bay performance in the steel processing industry. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 567–578, 2007.

PRICE C.J.; PUGH, D.R.; WILSON, M.S.; SNOOKE, N. The flame system: automating electrical failure mode and effects analysis (FMEA). In: **Proceedings of 1995 Annual Reliability and Maintainability Symposium**, p. 90–95.

PRICE, C.J.; TAYLOR, N.S. Automated multiple failure FMEA. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 76, p. 1-10, 2002.

PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; LA FUENTE, D. de. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.19, n.2, p. 137-150, 2002.

RAJA, R.; RAO, K.S. Performance evaluation through simulation modeling in a cotton spinning system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.15, p. 1163–1172, 2007.

RAMASWAMY, S. Modeling, Analysis and Simulation of Failures in a Materials Handling System with Extended Petri Nets. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.24, n. 9, 1994.

RASHID, M.M.; ISMAIL, H. Generic tool for measuring the reliability of product development processes. **Journal of Modelling in Management**, v.2, n.1, p. 71-93, 2007.

RAUSAND, M.; ØIEN, K. The basic concepts of failure analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v.53, n. 1, p. 73-83, 1996.

RAUSAND, M.; HØYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods and applications**. 2.ed. New York: Wiley; 2003. 664p.

RHEE, S.J.; ISHII, K. Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability. **Advanced Engineering Informatics**, v. 17, p. 179–188, 2003.

ROBINSON, S. A statistical process control approach to selecting a warm-up period for a discrete-event simulation. **European Journal of Operational Research**, v.176, p.332–346, 2007.

ROSEMANN, M. Potential pitfalls of process modeling: part A. **Business Process Management Journal**, v. 12, n. 2, p. 249-254, 2006.

ROSQVIST, T. Bayesian aggregation of experts' judgements on failure intensity. **Reliability Engineering & System Safety**, v.70, n.2, p. 283–289, 2000.

RUOHONEN, T.; NEITTAANMÄKI, P.; TEITTINEN, J. Simulation model for improving the operation of the emergency department of special health care. In: **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA.

RUSSOMANO, D.J.; BONNELL, R.D.; BOWLES, J.B. A blackboard model of an expert system for failure mode and effects analysis. In: **Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 1992, p. 483–489.

RUTLEDGE, P.J.; MOSLEH, A. Dependent-failures in spacecraft: root causes, coupling, factors, defenses, and design implications. In: **Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 1995.

RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**, v.57, p. 437–450, 2006.

SALIBY, E. Understanding the variability of simulation results: an empirical study. **Journal of the Operational Research Society**, Reino Unido, v.41, n.4, p.319-327, 1990.

SALIBY, E.; PAUL, R.J. Implementing Descriptive Sampling in Three-Phase Discrete Event Simulation Models. **Journal of the Operational Research Society**, Inglaterra, v.44, n.2, p.147-160, 1993

SANCHEZ, S.M. Work smarter, not harder: guidelines for designing simulation experiments. In: **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA.

SANCHEZ, S.M.; MOEENIB, F.; SANCHEZ, P.J. So many factors, so little time..... Simulation experiments in the frequency domain. **International Journal of Production Economics**, v.103, p. 149–165, 2006.

SARGENT, R.G. Validation and verification of simulation models. In: **Proceedings of the 2004 Winter Simulations Conference**, Washington, DC, USA.

SAVSAR, M. Maintenance crew size determination by computer simulation. In: **Proceeding of the First Scientific Symposium on Maintenance, Planning And Operations**, Riyadh, p. 95-108, 1990.

SAVSAR, M.; KHAN, M.; EL-TAMIMI, A. Modeling of maintenance polices in just-in-time production assembly systems. In: **Proceeding of the Second Scientific Symposium on Maintenance, Planning and Operations**, Riyadh, p. 95-108, 1993.

SCAFF, V.P. **Avaliação do fluxo de informações baseado nas premissas da gestão do conhecimento: um diagnóstico na Universidade Federal de Itajubá**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

SCAPIN, C.A. **Análise Sistêmica de Falhas**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

SEYED-HOSSEINI, S.M.; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M.J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, p. 872–881, 2006.

SHALEV, D.M.; TIRAN, J. Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, p. 1231–1241, 2007.

SHANNON, R.E. **Systems Simulation – The Art and Science**. Prentice-Hall, 1975.

SPEEDING, T.A.; CHAN, K.K. System level improvement using discrete event simulation. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.18, n.1, p.84 – 103, 2001.

STAMATIS, D.H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. 2.ed. Milwaukee: Quality Press, ASQC, 2003. 496p.

SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J.; ZHANG, S. An analytical model for interactive failures. **Reliability Engineering & System Safety**, v.91, p. 495–504, 2006.

SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J. Failure Analysis of Engineering Systems with Preventive Maintenance and Failure Interactions. **Computers & Industrial Engineering**, artigo aceito em 12 de agosto de 2008, aguardando publicação, doi: 10.1016/j.cie.2008.08.007, 2008.

TAN, C.M. Customer-focused build-in reliability: a case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 20, n. 3, p. 378-397, 2003.

TEOH, P.C.; CASE, K. Failure modes and effects analysis through knowledge modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 253–260, 2004.

THOMPSON, W. Introduction to witness and linking to process mapping tools. In: **Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference**, Arlington, VA, USA.

TORGA, B.L.M. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2007.

TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. 9.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2005. 656p.

TSENG, M. M.; QINHAI, M.; SU, C. Mapping Customers' Service Experience for Operations Improvement. **Business Process Management Journal**, v.5, n.1, p. 50-64, 1999.

VAN RENSBURG, A.; ZWEMSTRA, N. Implementing IDEF techniques as simulation modelling specifications. **Computers & Industrial Engineering**, v.29, n.1, p.467–471, 1995.

VAN VOLSEM, S.; DULLAERT, W.; VAN LANDEGHEM, H. An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 621–633, 2007.

VAURIO, J.K. Consistent mapping of common cause failure rates and alpha factors. **Reliability Engineering and System Safety**, v.92, p. 628–645, 2007.

VICENT, S. Input data analysis. In: BANKS, J. **Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. John Wiley & Sons, Inc., 1998, cap. 3.

VINEYARD, M.L.; MEREDITH, J.R. Effect of maintenance polices on FMS failures. **International Journal of Production Research**, v. 30, p. 2647-2657, 1992.

WEI, B.C. A Unified Approach to Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). In: **Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium**, 1991.

ZHOU, M.; ZHANG, Q.; CHEN, Z. What can be done to automate conceptual simulation modeling? In: **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**, Monterey, CA, USA.

## APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES ORIGINADAS

Alguns artigos originados com esta tese já foram publicados. São eles:

- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S. O uso do projeto de experimentos simulados para análise do efeito interativo de falhas em processos: um caso hipotético. **Sistemas e Gestão**, revista eletrônica, v.2, n.3, p.285-302, 2007.
- LEAL, F.; OLIVEIRA, M.L.M. de; ALMEIDA, D.A. de; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S.; MATOS, A.J. de M. Elaboração de modelos conceituais em simulação computacional através de adaptações na técnica IDEF0: uma aplicação prática. In: **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, PR, 2007.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B; MARINS, F.A.S. Análise do efeito de múltiplas falhas em um processo através do projeto de experimentos simulados. In: **XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Fortaleza, CE, 2007.
- MONTEVECHI, J.A.B.; PINHO, A.F. de; LEAL, F.; MARINS, F.A.S. Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: **Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference**, Washington, DC, USA.
- COSTA, R.F. da S.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J.A.B.; SANTOS, A.C.O.; SANTOS, M. Implantação do fluxo contínuo em uma célula de manufatura através de um estudo de simulação de eventos discretos. In: **XIV Simpósio de Engenharia de Produção**, Bauru, SP, 2007.

- MONTEVECHI, J.A.B.; COSTA, R.F. da S.; LEAL, F.; BATISTA, F.D.; MIRANDA, R. de C.; SANTOS, A.C.O.; SANTOS, M.J. Modelagem de uma célula de manufatura complexa através de IDEF0 e simulação de eventos discretos. In: **X Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha**, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MARINS, F.A.S. Aplicação do modelamento conceitual e projeto de experimentos simulados na análise do efeito de falhas em processos de manufatura. In: **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, trabalho apresentado em sessão dirigida, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B. Uma proposta de técnica de modelagem conceitual para a simulação através de elementos do IDEF. In: **XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, João Pessoa, PB, 2008.

Outros artigos foram submetidos a revistas e estão na fase de avaliação:

- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B.; MARINS, F.A.S.; BATISTA, F.D. The use of discrete event simulation and design of experiments in the analysis of interactive failures effect in manufacturing cells. Artigo submetido à revista *Simulation Modeling Practice and Theory*.
- LEAL, F.; COSTA, R.F. da S.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B.; MARINS, F.A.S. Aplicação de técnicas de verificação e validação de modelos de simulação: um caso prático. Artigo submetido à *Revista Produção*.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J.A.B.; MARINS, F.A.S.; MARINS, F.F. Multiple failure effects analysis in manufacturing processes by

means design of experiments and simulation techniques. Artigo submetido à Revista Pesquisa Operacional.