

Paulo José de Freitas Filho

Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena

2ª Edição

Visual Books

Sumário

Prefácio	15
1 Modelagem e Simulação de Sistemas	21
1.1 Definindo Simulação de Sistemas	21
1.2 Por que Simular?	23
1.3 Vantagens e Desvantagens da Simulação	25
1.4 Passos na Formulação de um Estudo Envolvendo Modelagem e Simulação	27
1.5 Erros mais Comuns na Abordagem via Simulação	34
2 Como Funcionam a Modelagem e a Simulação Discreta de Sistemas	37
2.1 Introdução	37
2.2 Terminologia Básica Utilizada em Modelagem e Simulação de Sistemas	39
2.2.1 Variáveis de Estado	40
2.2.2 Eventos	40
2.2.3 Entidades e Atributos	41
2.2.4 Recursos e Filas de Recursos	42
2.2.5 Atividades e Períodos de Espera	43
2.2.6 Tempo (Real) Simulado e Tempo de Simulação	44
2.2.7 Sistemas e Modelos	44
2.2.7.1 Classificação dos Sistemas para Modelagem e Simulação	46
2.2.7.2 Classificação dos Modelos de Simulação	46
2.2.7.3 Processo Experimental com Modelos de Simulação	51
2.3 Um Exemplo Simples para Começar	52
2.3.1 Como Tratar e Analisar o Problema	53
2.3.1.1 Emprego da Achrometria	54
2.3.1.2 Emprego de Modelagem Analítica	55
2.3.1.3 Emprego de Modelagem e Simulação	59
2.3.2 Tratando a Variabilidade dos Sistemas	68
2.3.3 Incorporando a Variabilidade aos Modelos Computacionais	77
2.3.4 O Método de Monte Carlo	78

2.3.4.1 Geradores de Números Aleatórios - GNA	78
2.3.4.2 Exemplo de um Gerador de Números Aleatórios (GNA)	79
2.3.4.3 Tabela de Simulação Manual Empregando o Método de Monte Carlo	81
2.3.5 Funções Geradoras de Variáveis Aleatórias	84
2.3.5.1 Exemplo de Geração de Variáveis Aleatórias Exponencialmente Distribuídas	85
2.4 Métodos de Modelagem	87
2.5 Mecanismos de Avanço do Tempo	90
2.5.1 Algoritmo Avanço do Tempo	91
2.6 Funcionamento de um Programa de Simulação	92
2.6.1 Evento Chegada de uma Entidade no Sistema	93
2.6.2 Evento Saída ou Fim de uma Atividade	94
2.6.3 Evento Fim da Simulação	95
2.6.4 Um Exemplo Empregando o Algoritmo do Avanço do Tempo	96
Exercícios	99

3 Usando o Ambiente Arena para Modelagem e Simulação

Discreta de Sistemas	103
3.1 Introdução	103
3.2 Interface do Ambiente Arena	104
3.2.1 A Tela Inicial	104
3.3 Construindo Modelos no Arena	106
3.3.1 Projeto 1	106
3.3.2 Projeto 2	118
Exercícios	128

4 Verificação e Validação de Modelos de Simulação

139	
4.1 Introdução	139
4.2 Verificação e Validação de Modelos de Simulação	140
4.3 Técnicas de Verificação de Modelos de Simulação	140
4.3.1 Uso de Modelos Determinísticos	141
4.3.2 Variações sobre os Dados de Entrada	143
4.3.3 Uso de Rotinas de Rastreamento (Trace)	144
4.3.4 Aplicação de Testes de Continuidade	146
4.3.5 Emprego de Testes de Degenerescência ou Robustez	147
4.3.6 Execução de Casos Simplificados	148
4.3.7 Verificação de Consistência	148
4.3.8 Independência de Sementes Geradoras de Números Aleatórios	149
4.3.9 Rotinas de Verificação	149

4.4 Técnicas de Validação de Modelos de Simulação	150
4.4.1 O Conhecimento e a Intuição de Especialistas	151
4.4.2 Medições Obtidas em Sistemas Reais	152
4.4.3 Resultados Teóricos	153
5 Análise e Tratamento de Dados para a Simulação	155
5.1 Introdução	155
5.2 Processo de Amostragem e Coleta dos Dados	157
5.2.1 Fontes de Dados	157
5.2.2 Amostragem	158
5.2.2.1 Estudo de Caso: Amostragem para um Modelo de uma Agência Bancária	159
5.2.2.1.1 Processo de Amostragem	162
5.2.2.1.2 Coleta de Dados dos Tempos entre Chegadas (TECC) dos Clientes dos Caixas	166
5.3 Tratamento dos Dados	169
5.3.1 Tabelas de Distribuição de Frequências e Histogramas (Variáveis Discretas)	170
5.3.2 Tabelas de Distribuição de Frequências e Histogramas (Variáveis Contínuas)	173
5.4 Identificação da Distribuição Teórica de Probabilidades	175
5.4.1 Principais Distribuições Teóricas de Probabilidades	175
5.4.1.1 Principais Distribuições Contínuas	176
5.4.1.1.1 Normal (m ; s)	176
5.4.1.1.2 Uniforme (a ; b)	178
5.4.1.1.3 Triangular (a ; m ; b)	178
5.4.1.1.4 Exponencial (b)	179
5.4.1.1.5 Lognormal (m ; s)	181
5.4.1.1.6 Erlang (b , m)	182
5.4.1.1.7 Gama (b ; m)	183
5.4.1.1.8 Beta (a ; b)	184
5.4.1.1.9 Weibull (a ; b)	185
5.4.1.2 Principais Distribuições Discretas	187
5.4.1.2.1 Poisson (l)	187
5.4.1.2.2 Uniforme Discreta (a ; b)	187
5.5 Estimação de Parâmetros	188
5.5.1 Medidas Descritivas e Medidas de Dispersão	188
5.5.2 Estimadores	189
5.6 Testes de Aderência	191

5.6.1	Teste Qui-quadrado (χ^2)	192
5.6.2	Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)	198
5.7	Ajuste de Distribuições com o Arena Input Analyzer	200
5.7.1	Procedimentos para o Ajuste a uma Distribuição Específica	203
5.7.2	Processo de Ajuste a todas as Distribuições	208
5.7.3	Considerações sobre o Emprego de Distribuições Teóricas de Probabilidades	213
	Exercícios	217
6	Análise dos Resultados da Simulação	219
6.1	Introdução	219
6.2	Experimentação e Análise de Resultados	220
6.3	Confiança Estatística para a Média	221
6.4	Classificando os Sistemas em Terminais ou Não-terminais	224
6.5	Análise de Sistemas Terminais	225
6.5.1	Tamanho da Amostra (número de replicações) para a Determinação da Média	226
6.6	Usando o Arena Output Analyzer para tratar Sistemas Terminais	230
6.6.1	Armazenando os Dados da Simulação	233
6.6.2	Usando o Arena Output Analyzer	236
6.7	Comparação de Alternativas	241
6.7.1	Empregando o Output Analyzer para a Comparação de Médias em Amostras Pareadas	244
6.8	Análise de Sistemas Não-terminais	246
6.8.1	Remoção da Fase Transiente	247
6.8.1.1	Longa Simulação	248
6.8.1.2	Inicialização Apropriada	248
6.8.1.3	Truncagem	248
6.8.1.4	Observação Visual	249
6.8.2	Determinação do Tamanho do Período de Simulação	251
6.8.2.1	Replicações Independentes	252
6.8.2.2	Regeneração	253
6.8.2.3	Loteamento	255
6.9	Usando o Arena Output Analyzer para tratar Sistemas Não-terminais	259
6.9.1	Aplicação do Método do Loteamento	263
6.9.2	Aplicação do Método das Múltiplas Replicações Independentes	271
	Exercícios	274

7 Projeto de Experimentos com Modelos de Simulação	277
7.1 Introdução	277
7.2 Terminologia	279
7.3 Estratégias de Projetos Experimentais	281
7.3.1 Bom Senso	281
7.3.2 Um Fator por Vez	282
7.3.3 Projeto Fatorial Completo	285
7.3.4 Projeto Fatorial Fracionário	287
7.3.5 Projeto Fatorial com Replicações	289
7.4 Projetos Fatoriais 2^k	289
7.4.1 Projeto Fatorial 2^2	290
7.4.1.1 Computação dos Efeitos dos Fatores em Projetos 2^2	292
7.4.1.2 Método da Tabela de Sinais para o Cálculo dos Efeitos de Projetos 2^2	294
7.4.1.3 Distribuição da Variação para Projetos 2^3	296
7.4.2 Projetos Fatoriais 2^k	298
7.5 Projetos Fatoriais com Replicações $2^k.r$	303
7.5.1 Projetos Fatoriais $2^2.r$	303
7.5.2 Tabela dos Sinais para o Cômputo dos Efeitos em Projetos $2^2.r$	304
7.5.3 Alocação das Variações	306
7.6 Projetos Experimentais Empregando Modelos de Simulação	307
7.6.1 Primeiro Estudo de Caso – Sistema de Manufatura	308
7.6.1.1 Descrição do Sistema	308
7.6.1.2 Estratégia de Experimentação	308
7.6.2 Segundo Estudo de Caso – Sistema Cliente/Servidor	313
7.6.2.1 Descrição do Sistema	313
7.6.2.2 Estratégia de Experimentação	315
7.6.2.3 Ensaios	317
7.6.2.4 Resultados do Primeiro Ensaio	321
7.6.2.5 Resultados do Segundo Ensaio	323
8 Modelagem Analítica: Teoria de Filas e Leis Operacionais	327
8.1 Introdução	327
8.2 Processos Estocásticos	329
8.3 Terminologia e Notação Básica da Teoria de Filas	333
8.3.1 Modelos de Filas e a Notação de Kendall	335
8.3.2 Principais Elementos para Análise de um Sistema de Fila Simples ...	337
8.4 Análise Estocástica e Modelos de Fila Simples	340
8.4.1 Modelo M/M/1	340

8.4.2 Modelo M/M/m	347
8.4.3 Modelo M/M/m/B	352
8.5 Leis Operacionais	354
8.5.1 Lei da Utilização	356
8.5.2 Lei do Fluxo Forçado	357
8.5.3 Lei da Demanda de Serviço	358
8.5.4 Lei de Little	359
8.5.5 Lei do Tempo de Resposta	362
8.5.6 Lei do Tempo de Resposta Interativo	365
Exercícios	366
Referências	371
Apêndice A	373
Apêndice B	375
Apêndice C	377
Apêndice D	379