ANDRÉ KOIDE DA SILVA

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE *SOFTWARES* DE
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADOS
À ANÁLISE DE SISTEMAS LOGÍSTICOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

**São Paulo
2006**

ANDRÉ KOIDE DA SILVA

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE *SOFTWARES* DE
SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS APLICADOS
À ANÁLISE DE SISTEMAS LOGÍSTICOS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Rui Carlos Botter

**São Paulo
2006**

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, André Koide da

Método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos / André Koide da Silva. -- São Paulo, 2006.

191 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Simulação de sistemas 2. Logística (Estatística) 3. Tomada de decisão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

À minha querida esposa, Cristina, e aos meus pais,
Cícero e Kimyo, com amor e gratidão por sua
compreensão, presença e incansável apoio ao
longo do período de elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor da vida, por ter me conduzido e permitido concluir este trabalho. Agradeço por Sua eterna e infinita bondade.

Ao professor e mestre Dr. Rui Carlos Botter, pela dedicação, confiança na condução, orientação e apoio na concretização deste trabalho.

Aos professores, Dr. Nicolau D. Fares Gualda, Dr. Cláudio Barbieri da Cunha, Dr. Marco Antonio Brinati, Dr. Hugo T. Yoshida Yoshizaki, Dr. Miguel César Santoro e Dr. José Aquiles Baesso Grimoni, pelos preciosos ensinamentos e apoio prestado.

Aos professores, Dr. Kechi Hirama e Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto, pelas valiosas sugestões para a continuidade deste trabalho.

À minha esposa, Cristina, companheira de todas as horas, ombro amigo, incentivadora, revisora e crítica, por toda sua compreensão, dedicação e apoio, sem os quais, este trabalho não seria possível.

Aos meus pais, Cícero e Kimyo, por terem incentivado o caminho dos estudos desde minha infância.

Aos amigos, Marcelo Fioroni e Luiz Otávio, pela crença e incentivo. Foi uma grande satisfação ter contado com vocês nessa jornada.

Aos amigos Eduardo Ascenço Reis, Fernando Dotta e Luciana Dotta, pelo incentivo e revisão do texto em inglês.

Aos professores da Universidade Presbiteriana Mackenzie, Dr. Arnaldo Rabello de Aguiar Vallim Filho, MSc. Enrique Carlos Haro Muñoz e MSc. José Carlos Bortot, pelo apoio e incentivo para realização deste trabalho.

Ao Luiz Augusto Franzese, diretor da Paragon Tecnologia – Rockwell Software, pelo apoio prestado.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pelo suporte financeiro para realização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

*“Mesmo as noites totalmente sem estrelas
podem anunciar a aurora de uma grande realização”*

Martin Luther King

RESUMO

A simulação de eventos discretos é uma das mais poderosas ferramentas disponíveis para modelagem e análise de problemas. Frequentemente ela é utilizada para o planejamento, projeto e controle de sistemas complexos em diversos segmentos; entre eles, a área de sistemas logísticos, que a tem aplicado extensivamente para analisar as capacidades logísticas, avaliar os impactos de mudanças nos processos produtivos, testar diferentes configurações na alocação de recursos limitados, determinar parâmetros das operações, validar novos projetos, entre outras aplicações. Esta popularização da simulação despertou o interesse das empresas especializadas no desenvolvimento de *softwares*, resultando em diversas opções com diferentes características e custos. Desta forma, identificou-se a necessidade de um método para seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados à resolução de problemas logísticos, pois os trabalhos disponíveis na Literatura abordam somente a escolha de *softwares* para fins genéricos. Para preencher essa lacuna, foi proposto um conjunto de critérios que endereçam as necessidades específicas do desenvolvimento de modelos voltados à análise de sistemas logísticos. Esses critérios formaram a base do método proposto, que incorporou as melhores características dos trabalhos identificados na Literatura. Sua primeira fase gerou uma lista com os *softwares* que suportaram os critérios definidos como essenciais por meio da aplicação de um método de atribuição de pesos e pontuação, cuja eficiência e simplicidade são amplamente reconhecidas; já a segunda fase, utilizou o método de análise hierárquica (AHP), recomendado para a tomada de decisão baseada em múltiplos critérios, por permitir a identificação e correção das inconsistências geradas pelo julgamento humano. Dois problemas testes também foram propostos para o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e condução de experimentos durante a segunda fase. Os *softwares* Arena, ProModel e @Risk, extensivamente utilizados para ensino e pesquisa na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, foram avaliados durante a aplicação prática do método proposto. Os resultados obtidos confirmaram a percepção, adquirida durante a segunda fase do método, de que os *softwares* Arena e ProModel apresentam características semelhantes, dada a discreta diferença em suas pontuações totais. Os diversos cenários desenvolvidos na análise de sensibilidade também ratificaram essa tendência.

Palavras-chaves: simulação de eventos discretos, sistema logístico, método de seleção, critério para avaliação, *software* de simulação.

ABSTRACT

The discrete event simulation is one of the most powerful tools available for modeling and problem analysis. Frequently it is used for planning, designing and controlling complex systems in several segments. The logistic system area has also applied it extensively to analyse the logistic capacities, evaluate the impacts of changes in the productive processes, test different configurations in the allocation of limited resources, determine operation parameters, validate new projects, among other applications. Thus, the growth of the simulation awoke the interest of the companies specialized in software development. This fact resulted in several options with different characteristics and costs. Because of this, it was identified the necessity of a selection method for discrete event simulation software dedicated to the resolution of logistic problems. The available works in Literature only approach the choice of softwares for generic purposes. To fill in this gap, a set of criteria that address the specific necessities of the development of models dedicated to the analysis of logistic systems was proposed. These criteria formed the base of the proposed method. It has incorporated the best characteristics of the works identified in Literature. Its first phase generated a list with softwares with widely recognized efficiency and simplicity that supported the essential criteria through the application of a scoring model. Its second phase used the Analytic Hierarchy Process (AHP) which is recommended for the decision taking based on multiple criteria because it allows the identification and correction of the inconsistencies generated by the human judgment. Two test problems have also been proposed for the development of applications in logistic systems and performance of experiments during the second phase. Arena, ProModel and @Risk, extensively used for education and research in the Polytechnical School of the University of São Paulo, were evaluated during the practical application of the proposed method. The results confirmed the perception acquired during the second phase of the method that Arena and ProModel present similar characteristics. They presented a discrete difference in their total score. The several scenes developed in the sensitivity analysis also ratified this trend.

Key Words: discrete event simulation, logistic system, selection method, criteria for evaluation, simulation software.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivações.....	2
1.2. Caracterização de sistemas logísticos.....	3
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Delineamento do trabalho.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. Seleção de <i>softwares</i> para simulação.....	9
2.1.1. Classificação das ferramentas de modelagem para simulação	11
2.1.2. Método para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação (BANKS, 1991).....	13
2.1.3. Método para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação (DAVIS e WILLIAMS, 1994).....	16
2.1.4. Método para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação (HLUPIC e MANN, 1995).....	19
2.1.5. Critérios para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação (NIKOUKARAN, HLUPIC e PAUL, 1998)	21
2.1.6. Método para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação (TEWOLDEBERHAN, VERBRAECK, VALENTIN e BARDONNET, 2002)... ..	26
2.1.6.1. Primeira fase: Verificação das características	26
2.1.6.2. Segunda fase: Verificação da qualidade.....	28
2.1.7. Comparação entre os métodos revisados.....	31
2.1.8. Normas para aquisição de <i>softwares</i>	33
2.1.8.1. IEEE 1062: Prática recomendada para aquisição de <i>software</i> (IEEE 1062, 1998)	33

2.1.8.2. NBR ISO/IEC 12207: Tecnologia da Informação – Processos de ciclo de vida de <i>software</i> (NBR ISO/IEC 12207, 1998)	36
2.1.8.3. NBR ISO/IEC 12119: Tecnologia da Informação – Pacotes de <i>software</i> – Teste e requisitos de qualidade (NBR ISO/IEC 12119, 1998)	38
2.1.8.4. Aplicabilidade das normas revisadas	40
2.2. Aplicações da simulação de eventos discretos	41
2.2.1. Aplicações em operações logísticas complexas	42
2.2.2. Aplicações em cadeia de suprimentos	43
2.2.3. Aplicações em sistemas de distribuição e transporte	44
2.2.4. Aplicações em planejamento e controle de estoque e produção	46
2.2.5. Aplicações em transporte aéreo	47
2.2.6. Aplicações em transporte rodo-ferroviário	49
2.2.7. Aplicações em transporte marítimo	51
2.2.8. <i>Softwares</i> de simulação utilizados nas aplicações	51
2.3. Conclusões do capítulo	56
3. MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE <i>SOFTWARES</i> DE SIMULAÇÃO APLICADOS À ANÁLISE DE SISTEMAS LOGÍSTICOS	59
3.1. Critérios para avaliação dos <i>softwares</i> de simulação	59
3.1.1. Características gerais	60
3.1.2. Entrada de dados	62
3.1.3. Desenvolvimento do modelo	64
3.1.4. Saída de dados	70
3.1.5. Eficiência e teste	73
3.1.6. Execução	75
3.1.7. Suporte técnico	76

3.2. Procedimento para seleção de <i>softwares</i> de simulação	78
3.2.1. Primeira fase: verificação dos critérios essenciais	79
3.2.1.1. Atribuição de pesos aos critérios.....	80
3.2.1.2. Identificação dos <i>softwares</i> de simulação e suas características.....	81
3.2.1.3. Classificação dos <i>softwares</i>	82
3.2.2. Segunda fase: avaliação da qualidade dos <i>softwares</i>	83
3.2.2.1. Desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e experimentos	84
3.2.2.2. Aplicação do método de análise hierárquica (AHP)	85
3.2.2.3. Análise de sensibilidade	90
3.3. Conclusões do capítulo.....	91
4. PROBLEMAS LOGÍSTICOS TÍPICOS.....	94
4.1. Dimensionamento da tancagem de um porto	95
4.1.1. Descrição do problema teste.....	97
4.2. Dimensionamento da frota.....	100
4.2.1. Descrição do problema teste.....	102
4.3. Conclusões do capítulo.....	106
5. APLICAÇÃO PRÁTICA DO MÉTODO PROPOSTO	107
5.1. Primeira fase: verificação dos critérios essenciais	108
5.1.1. Atribuição de pesos aos critérios	108
5.1.2. Identificação dos <i>softwares</i> de simulação e suas características	115
5.1.2.1. Características Gerais	116
5.1.2.2. Entrada de dados	118
5.1.2.3. Desenvolvimento do modelo.....	119
5.1.2.4. Saída de dados	122
5.1.2.5. Eficiência e teste.....	124

5.1.2.6. Execução	125
5.1.2.7. Suporte Técnico.....	127
5.1.3. Classificação dos <i>softwares</i>	128
5.2. Segunda fase: avaliação da qualidade dos <i>softwares</i>	129
5.2.1. Desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e experimentos	130
5.2.1.1. Dimensionamento da tancagem de um porto	130
5.2.1.2. Dimensionamento da frota de caminhões	141
5.2.1.3. Comentários gerais dos <i>softwares</i>	161
5.2.2. Aplicação do método de análise de hierárquica (AHP).....	165
5.2.3. Análise de sensibilidade	172
5.2.3.1. Sensibilidade às prioridades atribuídas aos critérios essenciais.....	172
5.2.3.2. Sensibilidade à atribuição da mesma prioridade para os critérios e sub- critérios.....	173
5.2.3.3. Sensibilidade à desconsideração dos sub-critérios.....	176
5.3. Conclusões do capítulo.....	178
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	180
REFERÊNCIAS	186

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Integração do sistema logístico com outras áreas.	5
Figura 2. Cadeia de suprimentos para uma empresa individual.	5
Figura 3. Estrutura hierárquica do AHP.	18
Figura 4. Procedimento para seleção de <i>softwares</i> de simulação.	79
Figura 5. Estrutura hierárquica do problema de seleção de <i>softwares</i> de simulação.	86
Figura 6. Caracterização do problema de dimensionamento da tancagem.	95
Figura 7. Dados do problema teste.	98
Figura 8. Modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da tancagem.	99
Figura 9. Modelo conceitual do sub-modelo para registrar o volume do tanque.	99
Figura 10. Caracterização do problema de dimensionamento da frota.	101
Figura 11. Dados do problema teste.	103
Figura 12. Modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da frota.	104
Figura 13. Volume médio do tanque para cada um dos cenários simulados.	140
Figura 14. Fila média dos navios para cada um dos cenários simulados.	140
Figura 15. Fila média dos caminhões-tanque para cada um dos cenários simulados.	141
Figura 16. Carga total transportada para cada um dos cenários simulados.	159
Figura 17. Fila média na balança da fábrica para cada um dos cenários simulados.	159
Figura 18. Fila média no posto de carga para cada um dos cenários simulados.	160
Figura 19. Fila média na balança do porto para cada um dos cenários simulados.	160
Figura 20. Fila média no posto de descarga para cada um dos cenários simulados.	161
Figura 21. Estrutura hierárquica do problema de seleção de <i>softwares</i> de simulação de eventos discretos.	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de ferramentas de modelagem para simulação.	12
Tabela 2. Critérios de entrada para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	14
Tabela 3. Critérios de processamento para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	14
Tabela 4. Critérios de saída para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	14
Tabela 5. Critérios de suporte para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	15
Tabela 6. Critérios de custo para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	15
Tabela 7. Critérios para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação.....	16
Tabela 8. Critérios do fornecedor para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	22
Tabela 9. Critérios de desenvolvimento para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	22
Tabela 10. Critérios de execução para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	23
Tabela 11. Critérios de animação para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	23
Tabela 12. Critérios de eficiência e teste para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	24
Tabela 13. Critérios de saída para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	24
Tabela 14. Critérios do usuário para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	25
Tabela 15. Resumo dos métodos revisados para avaliação e seleção de <i>softwares</i> de simulação de eventos discretos.....	32
Tabela 16. Fases do processo de aquisição de <i>software</i>	34
Tabela 17. Resumo das aplicações em operações logísticas complexas.	52
Tabela 18. Resumo das aplicações em cadeia de suprimentos.....	52
Tabela 19. Resumo das aplicações em sistemas de distribuição e transporte.	53
Tabela 20. Resumo das aplicações em planejamento e controle de estoque e produção.	54
Tabela 21. Resumo das aplicações em transporte aéreo.....	54
Tabela 22. Resumo das aplicações em transporte rodo-ferroviário.....	55
Tabela 23. Resumo das aplicações em transporte marítimo.....	55

Tabela 24. Características gerais para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	61
Tabela 25. Critérios de entrada de dados para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	63
Tabela 26. Critérios de desenvolvimento para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	69
Tabela 27. Critérios de saída de dados para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	72
Tabela 28. Critérios de eficiência e teste para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	74
Tabela 29. Critérios de execução para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	76
Tabela 30. Critérios de suporte técnico para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.	78
Tabela 31. Escala de julgamentos para comparação paritária.	86
Tabela 32. Matriz de comparação paritária.	87
Tabela 33. Valores para o índice randômico (IR).	88
Tabela 34. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação das características gerais.	109
Tabela 35. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da entrada de dados.	110
Tabela 36. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação do desenvolvimento do modelo. ...	111
Tabela 37. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da saída de dados.....	113
Tabela 38. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da eficiência e teste.	114
Tabela 39. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da execução.	114
Tabela 40. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação do suporte técnico.	115
Tabela 41. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação das características gerais.....	117
Tabela 42. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação da entrada de dados.	119
Tabela 43. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação do desenvolvimento do modelo.....	121
Tabela 44. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação da saída de dados.	123

Tabela 45. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação da eficiência e teste.....	125
Tabela 46. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação da execução.	126
Tabela 47. Pontuação atribuída aos <i>softwares</i> de simulação em cada um dos critérios para avaliação do suporte técnico.....	127
Tabela 48. Pontuação total obtida pelos <i>softwares</i> de simulação.....	128
Tabela 49. Pontuação atribuída aos critérios essenciais.	129
Tabela 50. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (dados determinísticos para validação do modelo).....	132
Tabela 51. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 400.000 toneladas).....	132
Tabela 52. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 160.000 toneladas).....	133
Tabela 53. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 120.000 toneladas).....	133
Tabela 54. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 80.000 toneladas).....	134
Tabela 55. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 60.000 toneladas).....	134
Tabela 56. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 50.000 toneladas).....	135
Tabela 57. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 40.000 toneladas).....	135
Tabela 58. Dados coletados para o cenário inicial – validação do modelo (SS ₁).....	137

Tabela 59. Dados coletados para o cenário inicial – validação do modelo (SS ₂).....	137
Tabela 60. Cálculo do tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque para o software SS ₂ , efetuado conforme o procedimento realizado pelo software SS ₁ . .	138
Tabela 61. Resultados consolidados para o software SS ₁	139
Tabela 62. Resultados consolidados para o software SS ₂	139
Tabela 63. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (validação do modelo).	144
Tabela 64. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (validação do modelo).	144
Tabela 65. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 10 caminhões).....	145
Tabela 66. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 10 caminhões).....	145
Tabela 67. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 20 caminhões).....	146
Tabela 68. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 20 caminhões).....	146
Tabela 69. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 30 caminhões).....	147
Tabela 70. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 30 caminhões).....	147
Tabela 71. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 25 caminhões).....	148
Tabela 72. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 25 caminhões).....	148

Tabela 73. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 23 caminhões).....	149
Tabela 74. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 23 caminhões).....	149
Tabela 75. Resultados consolidados para o <i>software</i> SS ₁	151
Tabela 76. Resultados consolidados para o <i>software</i> SS ₂	151
Tabela 77. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 23 caminhões).....	152
Tabela 78. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 23 caminhões).....	152
Tabela 79. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 25 caminhões).....	153
Tabela 80. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 25 caminhões).....	153
Tabela 81. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 30 caminhões).....	154
Tabela 82. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 30 caminhões).....	154
Tabela 83. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 35 caminhões).....	155
Tabela 84. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 35 caminhões).....	155
Tabela 85. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 29 caminhões).....	156

Tabela 86. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 29 caminhões).....	156
Tabela 87. Novos resultados consolidados para o <i>software</i> SS ₁	157
Tabela 88. Novos resultados consolidados para o <i>software</i> SS ₂	158
Tabela 89. Identificação adotada para os critérios essenciais.	167
Tabela 90. Comparação paritária dos critérios essenciais (C ₁ a C ₁₄).	168
Tabela 91. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C ₂	168
Tabela 92. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C ₈	169
Tabela 93. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C ₁₀	169
Tabela 94. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C ₁ (a), C _{2.1} (b), C _{2.2} (c) e C ₃ (d).....	169
Tabela 95. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C ₄ (a), C ₅ (b), C ₆ (c) e C ₇ (d).....	170
Tabela 96. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C _{8.1} (a), C _{8.2} (b), C _{8.3} (c) e C _{8.4} (d).	170
Tabela 97. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C _{8.5} (a), C ₉ (b) e C _{10.1} (c).....	170
Tabela 98. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C _{10.2} (a), C _{10.3} (b) e C ₁₁ (c).	170
Tabela 99. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS ₁ e SS ₂ em relação aos critérios C ₁₂ (a), C ₁₃ (b) e C ₁₄ (c).	171
Tabela 100. Faixas de variação na prioridade atribuída aos critérios essenciais que não alteram o resultado obtido.	173
Tabela 101. Nova comparação paritária dos critérios essenciais (considerando-se que todos possuem a mesma importância).....	174

Tabela 102. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C_2 (considerando-se que todos possuem a mesma importância).....	174
Tabela 103. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C_8 (considerando-se que todos possuem a mesma importância).....	174
Tabela 104. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C_{10} (considerando-se que todos possuem a mesma importância).....	175
Tabela 105. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c) e C_4 (d).	176
Tabela 106. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_5 (a), C_6 (b), C_7 (c) e C_8 (d).	176
Tabela 107. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_9 (a), C_{10} (b) e C_{11} (c).	177
Tabela 108. Comparação paritária dos <i>softwares</i> SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_{12} (a), C_{13} (b) e C_{14} (c).....	177
Tabela 109. Resultados obtidos com a aplicação do método proposto.	183

ABREVIATURAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
COTS	<i>Commercial off the Shelf Software</i>
CSV	<i>Comma Separated Value</i>
DMS	<i>Distributed Manufacturing Simulation</i>
DMSO	<i>Defense Modeling and Simulation Office</i>
FAQs	<i>Frequently Asked Questions</i>
FD	<i>Fully Developed</i>
FIFO	<i>First In, First Out</i>
HLA	<i>High Level Architecture</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIT	<i>Just-In-Time</i>
LIFO	<i>Last In, First Out</i>
MB	<i>Mega Byte</i>
MOTS	<i>Modified off the Shelf Software</i>
MSE	<i>Modular Simulation Environment</i>
NBR	<i>Norma Brasileira</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RTI	<i>Run Time Infrastructure</i>
SQL	<i>Structured Query Language</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>

1. INTRODUÇÃO

Diversas definições para a simulação estão disponíveis na Literatura. Segundo Shannon (1992), a simulação é uma ferramenta que permite projetar o modelo de um sistema real e realizar experimentos com o mesmo, a fim de entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação. Já Banks (1999), define a simulação como a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real. Para Freitas (2001), a simulação consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, que permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou sistema do mundo real.

É possível notar que a simulação compreende, além da construção do modelo, um método experimental que busca (SHANNON, 1992):

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias ou hipóteses baseadas nas observações realizadas;
- Utilizar o modelo para prever o comportamento futuro, ou seja, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou em seus métodos de operação.

Um modelo de simulação caracteriza matematicamente um sistema, cujo estado pode ser descrito, em um determinado instante, por um conjunto de variáveis estocásticas e determinísticas, conhecidas como **variáveis de estado**. Os modelos podem ser classificados como discretos ou contínuos. Nos **modelos discretos**, as variáveis de estado mantêm-se inalteradas ao longo de intervalos de tempo e mudam seus valores somente em pontos bem definidos, conhecidos como tempo de ocorrência de eventos; já nos **modelos contínuos**, as variáveis de estado podem mudar seus valores continuamente ao longo do tempo (FREITAS, 2001).

Na **simulação de eventos discretos**, neste trabalho também referenciada simplesmente como simulação, as variáveis de estado somente sofrem mudanças nos pontos discretos de tempo em que ocorrem eventos. Os **eventos** são acontecimentos, programados ou não, tais como a chegada de caminhões, o início do descarregamento de produtos, a saída de caminhões do sistema, entre outros. É importante destacar, ainda, que esta ferramenta pode ser empregada na simulação de modelos contínuos, desde que sejam adotadas algumas aproximações.

1.1. Motivações

A simulação de eventos discretos é, atualmente, uma das mais poderosas ferramentas de análise disponível para o planejamento, projeto e controle de sistemas complexos (SHANNON, 1992). A apresentação de um problema, para gerentes e clientes, utilizando um modelo de simulação, também tem maior credibilidade que outras ferramentas, como os métodos analíticos, por permitir a captura de detalhes da operação sem a necessidade de muitas simplificações e possibilitar, ainda, a comparação de seu comportamento frente ao sistema real.

Assim, a difusão da simulação, como ferramenta de modelagem e análise de problemas em diferentes áreas, despertou o interesse de diversas empresas especializadas no desenvolvimento de *softwares*, resultando em dezenas de *softwares* comerciais de simulação de eventos discretos, com diferentes características, vantagens, desvantagens e custos. É importante destacar que o termo *software*, referenciado neste trabalho, refere-se aos **softwares de prateleira** ou COTS (*Commercial off the Shelf Software*), ou seja, produtos de *software* prontos para o uso, que apresentam um conjunto de características funcionais e de qualidade pré-definidas pelo fornecedor, às quais o adquirente se adapta durante o uso.

Concorrentemente à popularização da simulação, houve um significativo crescimento na área de sistemas logísticos, que passou a utilizar esta ferramenta para analisar capacidades, avaliar os impactos de mudanças nos processos produtivos, testar configurações de alocação de recursos limitados, determinar parâmetros de operações para garantir a continuidade da produção, validar novos projetos, entre outras aplicações.

Neste contexto, caracterizado pelas diversas opções de *softwares* de simulação e sua crescente utilização em sistemas logísticos, notou-se a importância de métodos que permitam avaliar e selecionar *softwares* de simulação de eventos discretos que atendam plenamente às necessidades das aplicações desenvolvidas – com características que facilitem a construção de modelos e a depuração de erros, suportando diferentes formatos e disponibilizando recursos para o tratamento dos dados de entrada, possibilitando a geração de relatórios de saída personalizados etc. – com o menor custo total associado, desde o tempo necessário para coleta de informações e para avaliação dos *softwares* disponíveis no mercado, aos custos ligados à aquisição de licença, *hardware*, manutenção, suporte, entre outros.

1.2. Caracterização de sistemas logísticos

A **logística empresarial**, referenciada neste trabalho simplesmente como logística, é uma área relativamente nova da gestão integrada, quando comparada às áreas tradicionais de *marketing*, produção e transporte, que procura gerenciar as atividades – como suprimento de materiais e componentes, processamento, estocagem e distribuição física – de forma coordenada e agregar valor aos produtos ou serviços que são essenciais para às vendas e à satisfação dos clientes (BALLOU, 2001).

Segundo Ferreira (1986), a logística pode ser caracterizada como a parte da arte de guerra que trata do planejamento e da realização do projeto e desenvolvimento, obtenção, armazenamento, transporte, distribuição, reparação, manutenção e evacuação de materiais.

Nota-se que esta definição tem enfoque no contexto militar, em razão de sua própria origem, cujos objetivos e as atividades diferem daqueles do meio empresarial; assim, a logística pode ser mais bem definida como a parte do processo de **gerenciamento da cadeia de suprimentos** que planeja, implementa e controla o fluxo (direto e reverso) e armazenamento eficiente e eficaz de produtos, serviços e informações correlacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de destino, com o propósito de atender às necessidades dos clientes (CSCMP, 2005). Dessa forma, o objetivo da logística é dispor as mercadorias ou serviços apropriados nos locais certos, nos momentos precisos e nas condições desejadas pelos clientes, proporcionando a máxima contribuição para a empresa (BALLOU, 2001).

As atividades de um sistema logístico típico incluem o gerenciamento de transporte e frotas, armazenagem, manuseio de materiais, processamento de pedidos, projeto da rede logística, controle de estoques, previsão de vendas, gerenciamento de operadores logísticos, planejamento e programação da produção, embalagem e montagem, serviços ao cliente, entre outras. Segundo o CSCMP (2005), o gerenciamento do sistema logístico é uma função que coordena e otimiza estas atividades, ao mesmo tempo em que as integra com outras áreas, como *marketing*, produção, transporte e tecnologia da informação (figura 1).

O sistema logístico é, ainda, parte integrante ou subconjunto da cadeia de suprimentos, que busca a integração dos diversos processos de negócios e organizações, desde os fornecedores de matéria-prima até o cliente final. O gerenciamento da cadeia de suprimentos pressupõe, fundamentalmente, que as empresas definam suas estratégias competitivas e funcionais por intermédio de seus posicionamentos dentro da cadeia produtiva nas quais se inserem (abrangendo a relação da empresa com seus fornecedores e clientes), procurando reduzir custos e agregar o máximo valor ao cliente (figura 2).

Figura 1. Integração do sistema logístico com outras áreas.

Fonte: Adaptado de Novaes (1989), Ballou (2001) e CSCMP (2005).

Figura 2. Cadeia de suprimentos para uma empresa individual.

Fonte: Adaptado de Ballou (2001).

Nesse contexto, a simulação de eventos discretos tem sido aplicada como ferramenta para modelagem e análise de diversos problemas, tais como:

- Analisar as capacidades dos componentes de sistemas complexos;
- Dimensionar a capacidade de tanques;
- Avaliar o desempenho de armazéns não automatizados;
- Validar métodos analíticos de controle de estoques;
- Prever o efeito de mudanças na frota de manuseio de materiais;
- Estudar os efeitos de informações em tempo real sobre o tráfego nas rotas obtidas com *softwares* de roteirização de veículos;
- Auxiliar na alocação de recursos e prevenção de gargalos;
- Validar o projeto de novos terminais de passageiros;
- Avaliar o impacto global de mudanças nos processos produtivos;
- Estudar a junção de cadeias de suprimentos com diferentes filosofias de operação;
- Analisar a eficiência dos métodos de armazenamento e processamento de pedidos;
- Dimensionar as frotas de caminhões;
- Avaliar o desempenho de componentes do sistema logístico;
- Determinar parâmetros das operações para garantir a continuidade da produção;
- Investigar os impactos gerados por diferentes processos de chegada e atendimento;
- Estimar informações para introdução de novos serviços aos clientes;
- Avaliar a segurança e o nível de risco em empresas de transporte.

1.3. Objetivos

Neste trabalho será apresentada a revisão bibliográfica das principais pesquisas que abordam métodos para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, procurando estudos relevantes para a escolha de *softwares* voltados ao desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos. Também serão identificados os problemas típicos desta

área, traçando um panorama atual do uso da simulação de eventos discretos em sistemas logísticos e localizando suas sub-áreas de aplicação, as características essenciais e os objetivos de cada um dos modelos criados.

A principal meta é a proposta de um conjunto de critérios para avaliação dos *softwares* de simulação, que será identificado a partir do estudo das características e dos objetivos das aplicações já desenvolvidas para a resolução de problemas típicos. Esses critérios formarão a base do método que será descrito para seleção dos *softwares*. Também serão propostos dois problemas testes, representativos de casos típicos em sistemas logísticos; o primeiro abordará o dimensionamento da tancagem de um porto e, o segundo, tratará do dimensionamento de uma frota de caminhões. Por fim, serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação prática do método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, descrevendo as análises realizadas durante o desenvolvimento e execução dos modelos construídos para os problemas testes.

1.4. Delineamento do trabalho

Neste primeiro capítulo, são abordadas algumas das definições de simulação e conceitos básicos para caracterização da simulação de eventos discretos e de sistemas logísticos. Também são descritas as motivações para o desenvolvimento deste trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo, serão apresentados diversos trabalhos identificados na Literatura que propõem métodos para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos. Serão descritas também diversas aplicações da simulação para análise e resolução de problemas em sistemas logísticos, abrangendo casos em operações complexas, cadeia de suprimentos, sistemas de distribuição e transporte, planejamento e controle de estoque e produção, transporte aéreo, transporte rodo-ferroviário e transporte marítimo.

O terceiro capítulo abordará a descrição detalhada de cada um dos critérios propostos para avaliação e o método para seleção dos *softwares* de simulação de eventos discretos voltados ao desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos.

O quarto capítulo apresentará dois problemas testes, representativos de casos típicos em sistemas logísticos; será destacada, sucintamente, a importância prática dos problemas de dimensionamento da tancagem de um porto e dimensionamento da frota de caminhões com enfoque à situação atual do sistema portuário brasileiro.

No quinto capítulo, serão apresentados os resultados e a análise da aplicação prática do método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, por meio da modelagem e desenvolvimento de experimentos com os problemas testes descritos no capítulo anterior.

Para encerrar, o último capítulo abordará as conclusões finais deste trabalho, analisando a relevância, as vantagens e as desvantagens da aplicação do método proposto. Também serão apresentadas algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais estudos publicados que tratam da questão da avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos. Esses trabalhos foram motivados pela diversidade de opções disponíveis no mercado e pela crescente popularidade da simulação na modelagem e análise de problemas em diferentes áreas. Serão descritas, adicionalmente, algumas normas relevantes ao processo de aquisição de *softwares*.

Também serão apresentados diversos estudos que utilizaram a simulação de eventos discretos para avaliação e análise de problemas em sistemas logísticos, abrangendo aplicações em operações complexas, cadeia de suprimentos, sistemas de distribuição e transporte, planejamento e controle de estoque e produção, transporte aéreo, transporte rodo-ferroviário e transporte marítimo.

A revisão bibliográfica desenvolvida neste capítulo tem como objetivos principais: (1) estudar os métodos propostos para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, identificando os trabalhos relevantes para aplicação em sistemas logísticos; (2) buscar problemas representativos de sistemas logísticos, traçando um panorama atual do uso da simulação de eventos discretos nessa área, identificando suas sub-áreas de aplicação, suas principais características e os objetivos de cada um dos modelos construídos.

2.1. Seleção de *softwares* para simulação

Diversos *softwares* de simulação estão disponíveis no mercado devido à crescente popularidade da sua aplicação na modelagem e análise de problemas em diferentes áreas. O *Simulation Software Survey*, levantamento publicado pela *ORMS Today* (2003), identificou 48 *softwares* de simulação de eventos discretos. Já o *Buyer's Guide Simulation* (ELLIOTT, 2000), cita 59 opções, entre *softwares* de apoio estatístico e, principalmente, de simulação.

Assim, decidir qual *software* de simulação utilizar em uma área particular de aplicação ou em um determinado projeto é uma tarefa complexa, dadas as diversas opções disponíveis. Custos, familiaridade, características funcionais, entre outros fatores, devem ser considerados ao avaliar cada um dos *softwares*.

Banks (1996) apresentou as principais características de diversos *softwares* de simulação para propósitos gerais e orientados a sistemas de manufatura. Descreveu também alguns *softwares* utilizados para planejamento de capacidade, programação da produção, alocação de recursos, reengenharia de processos de negócios e apoio ao projeto de simulação. Por fim, o autor abordou os **ambientes de simulação**: *softwares* que contêm diversos recursos para conduzir um estudo de simulação, permitindo a análise de dados de entrada e saída, a modelagem, o gerenciamento de cenários e animação.

Alguns *softwares* de simulação para comunicação de dados, redes de computadores, aplicações na área médica e de serviços foram apresentados por Banks (1993). Este mesmo autor descreveu em 1995 um *software* genérico de animação da simulação para simuladores que não possuem este recurso integrado.

Inúmeros fatores técnicos possibilitaram o surgimento dessa gama de *softwares* e contribuíram para sua rápida evolução. Entre eles, destacam-se (BANKS, 1992):

- O aumento da capacidade dos micro-computadores, que permitiu a adição de novos recursos aos *softwares* sem grandes incrementos no tempo de processamento;
- A evolução do *hardware* dos processadores de imagens gráficas;
- Os novos sistemas operacionais, que possibilitaram a modelagem de sistemas maiores por meio do acesso aleatório à memória;
- A redução dos custos dos discos rígidos (*hard disks*), que permitiu o armazenamento de sistemas operacionais maiores e diversos outros *softwares*;

- O advento dos sistemas operacionais gráficos;
- A tendência geral de *softwares* mais amigáveis e fáceis de utilizar.

Um analista inexperiente pode despende até meses para avaliar a documentação dos *softwares* e examinar as cópias obtidas para demonstração (BANKS, 1991). É indispensável também destacar que a escolha de um *software* adequado é importante, mas não é a única tarefa. Banks, Carson e Nelson (1996) apresentaram um conjunto com 12 passos para guiar um projeto de simulação.

Assim, dadas as inúmeras opções disponíveis no mercado, nota-se a importância da adoção de um método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos. A próxima seção descreverá brevemente a classificação das ferramentas de modelagem para simulação proposta por Banks (1991), bem como suas características relevantes. Também serão apresentados os principais trabalhos que tratam da seleção de *softwares* de simulação, publicados por Banks (1991), Davis e Williams (1994), Hlupic e Mann (1995), Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) e Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002). A seguir, será desenvolvida uma análise comparativa entre os métodos propostos por esses autores e, por fim, serão abordadas as normas IEEE 1062 (IEEE 1062, 1998), NBR ISO/IEC 12207 (NBR ISO/IEC 12207, 1998) e NBR ISO/IEC 12119 (NBR ISO/IEC 12119, 1998), que descrevem as práticas recomendadas para o processo de aquisição de *softwares*.

2.1.1. Classificação das ferramentas de modelagem para simulação

Banks (1991) apresentou quatro classes de ferramentas de modelagem para simulação. Para esses agrupamentos, foram considerados: o tempo de desenvolvimento do modelo, a complexidade e o controle do sistema modelado, a saída de dados, a precisão e a fidelidade do

modelo, o treinamento necessário e as características dos problemas que essas ferramentas se prestam a resolver. A tabela 1 apresenta detalhes de cada uma das classes.

Tabela 1. Classes de ferramentas de modelagem para simulação.

Característica	Planilhas Eletrônicas	Ferramentas de modelagem rápida	Simuladores	Linguagens de Simulação
Tempo de desenvolvimento	Mínimo	Mínimo	Moderado	Moderado; Substantial
Controle do modelo e complexidade do sistema	Deficiente para sistemas dinâmicos	Vago; Moderado	Deve respeitar as restrições do <i>software</i>	Excelente; Virtualmente qualquer sistema complexo
Saída de dados	Desenvolvida e definida pelo usuário	Estatisticamente adequada; Orientada a relatório	Varia de acordo com o <i>software</i> ; Tipicamente orientada a relatório	Relatórios definidos pelo usuário; Personalizável
Precisão e fidelidade	Geralmente imprecisa para sistemas dinâmicos	Boa ferramenta para planejamento inicial (<i>Rough Cut Planning</i>)	Varia com o nível de detalhamento	Excelente
Treinamento	Mínimo	Moderado; Frequentemente utiliza interface através de planilhas eletrônicas	Moderado	Moderado; Substantial
Aplicação	Sistemas estáticos; Operações determinísticas	Aplicações probabilísticas com pouca complexidade; Múltiplas alternativas	Aplicações probabilísticas com média complexidade; Dados disponíveis; Aplicações específicas	Aplicações probabilísticas com alta complexidade; Dados disponíveis; Aplicações gerais

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

2.1.2. Método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação

(BANKS, 1991)

Banks (1991) apresentou um conjunto de critérios para avaliação de *softwares* de simulação de eventos discretos classificados em cinco categorias:

- Critérios de entrada;
- Critérios de processamento;
- Critérios de saída;
- Critérios de suporte;
- Critérios de custo.

O autor destaca a importância de conhecer quais critérios são relevantes e quais não são apropriados para cada caso particular. Por exemplo, somente é necessário avaliar a animação tridimensional, se o modelo de simulação for utilizá-la.

Alguns recursos também não podem ser julgados simplesmente como presentes ou ausentes. Por exemplo, considerando o critério de interface com outras linguagens (Fortran, C ou Pascal), um *software* de simulação pode ser avaliado conforme sua habilidade em evitar a necessidade de programação de sub-rotinas em Fortran, em vez de somente considerar a possibilidade de interface com esta linguagem.

Ainda, segundo o autor, os critérios apresentados nas tabelas 2 a 6 são válidos para avaliação de *softwares* e linguagens de simulação. Planilhas eletrônicas e ferramentas de modelagem rápida não permitem a construção de modelos detalhados, não podendo, portanto, serem julgadas segundo os critérios a seguir.

Tabela 2. Critérios de entrada para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de entrada
Interface com outros <i>softwares</i>
Capacidade de análise de dados de entrada
Portabilidade (independência de sistema operacional)
Sintaxe (consistente e sem ambigüidades)
Flexibilidade de entrada (interativa e <i>batch</i>)
Depuração interativa (<i>interactive debugger</i>)
Flexibilidade na modelagem (aplicada somente às linguagens de simulação)
Concisão na modelagem (aplicada somente às linguagens de simulação)

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

Tabela 3. Critérios de processamento para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de processamento
Velocidade de execução
Tamanho do modelo
Capacidade de manuseio de materiais: esteiras, robôs, guindastes, entre outras
Gerador de variáveis aleatórias (distribuições básicas e empíricas)
Período de aquecimento (<i>warm-up period</i>)
Replicações independentes (conjunto diferente de números aleatórios)
Configuração de atributos às transações (entidades)
Variáveis globais
Possibilidade de programação para incorporar características especiais
Roteamento condicional (<i>conditional routing</i>)

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

Tabela 4. Critérios de saída para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de saída
Relatórios padrão com medidas de desempenho
Relatórios personalizados
Análise estatística
Geração de gráficos (barra, histograma, entre outros)
Criação de arquivos compatíveis com planilhas eletrônicas, banco de dados etc.
Capacidade de rastreamento (<i>tracing capability</i>)
Manutenção do banco de dados (organização dos dados coletados)

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

Tabela 5. Critérios de suporte para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de suporte
Facilidade de uso
Facilidade de aprendizagem
Qualidade da documentação
Capacidade de animação: facilidade de desenvolvimento, qualidade das figuras, suavidade nos movimentos, portabilidade da visualização remota, interface com <i>softwares</i> CAD
Ajuda <i>on-line</i>
Tutorial <i>on-line</i>
Suporte ao cliente: treinamento, suporte técnico e atualizações

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

Tabela 6. Critérios de custo para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de custo
Aquisição da licença do <i>software</i>
Requisitos de <i>hardware</i>
Tempo gasto com aprendizagem do <i>software</i>
Tempo necessário para construção de modelos

Fonte: Adaptado de Banks, 1991.

Com base nos critérios apresentados, o autor sugere a utilização de um modelo de pontuação (*scoring model*) para, a partir de uma lista com diversos *softwares*, restringir o escopo de busca em 3 opções. Assim, um valor entre 0 e 10 deve ser atribuído para cada critério, definindo um conjunto de pesos. A seguir, estes devem ser avaliados, por meio de uma pontuação entre zero e um, para cada um dos *softwares*. A pontuação bruta de cada critério (entre zero e um) deve ser multiplicada pelo peso associado e somada para cada uma das opções, obtendo-se uma lista com os *softwares* ordenados conforme o grau de atendimento aos critérios avaliados. A atribuição de pesos permite definir critérios dispensáveis (peso 0), ou seja, que não serão utilizados, e critérios essenciais para o sucesso do modelo de simulação (peso 10).

Dessa forma, por intermédio da aplicação deste método, é possível reduzir o número de opções, que devem ainda passar por uma cuidadosa avaliação comparativa para seleção de qual *software* será utilizado no projeto de simulação.

2.1.3. Método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação (DAVIS e WILLIAMS, 1994)

Davis e Williams apresentaram, em um artigo publicado em 1994, os resultados de seu trabalho sobre a avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, utilizando o método de análise hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*).

Os autores elaboraram inicialmente uma lista com 8 critérios (alguns destes divididos em sub-critérios), identificados principalmente a partir de estudos de caso desenvolvidos para pequenos modelos, representativos de problemas reais (tabela 7).

Tabela 7. Critérios para avaliação e seleção de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação e seleção
Custo
Integralidade do sistema (<i>comprehensiveness of the system</i>)
Flexibilidade
Recursos gráficos
Distribuições estatísticas
Integração com outros sistemas
Documentação
Manual de instruções
Manual de referência
Treinamento
Facilidade de uso
Conhecimento prévio requerido
Para o usuário novo
Para o usuário experiente
Para o usuário final
<i>Hardware</i> e instalação
Questões ligadas à credibilidade do fornecedor
Fonte: Adaptado de Davis e Williams, 1994.

A partir dos 14 *softwares* de simulação identificados, 5 foram escolhidos para avaliação após a revisão das restrições de *software* e *hardware*, verificação da disponibilidade de suporte local e da cobertura de diferentes enfoques de simulação (baseada em atividades, eventos e processos).

Davis e Williams (1994) utilizaram o método de análise hierárquica (AHP) para a seleção dos *softwares* de simulação. Segundo os autores, os métodos de decisão por múltiplos critérios baseados na atribuição de pesos e pontuação não tratam do problema da inconsistência existente no julgamento humano, pois, quanto maior o número de características definidas para avaliação, mais significativa se torna a questão da inconsistência. Assim, tendo constatado que a natureza do método de decisão para a escolha do *software* de simulação é um procedimento hierárquico, cujos critérios são avaliados e as alternativas são medidas em termos de desempenho em relação a estes critérios, o AHP foi escolhido para análise da decisão e planejamento dos múltiplos critérios.

Esse método pode ser descrito pelas seguintes características básicas (MORITA, 1998):

- Aplicação em problemas orientados por múltiplos critérios estruturados hierarquicamente;
- Capacidade de considerar simultaneamente critérios quantitativos e qualitativos;
- Julgamento dos critérios por meio de comparações paritárias;
- Resultado final que permite ordenar os critérios e alternativas em função de sua importância, com graduações (notas, pontuações ou medidas);
- Aplicação em questões complexas ou que envolvam julgamentos subjetivos;
- Capacidade de lidar e absorver julgamentos inconsistentes;
- Resultado que não extrapola os limites do conjunto de alternativas pré-estabelecidas;

- Não obrigatoriedade dos fatores serem representados em termos de valores econômico-financeiros, técnicos ou físicos.

Para aplicar o AHP, é importante definir o objetivo global e selecionar os critérios e sub-critérios para se atingir este objetivo. Além disso, todos os elementos deverão estar estruturados hierarquicamente ou em formato de árvore invertida (figura 3).

Figura 3. Estrutura hierárquica do AHP.
Fonte: Adaptado de Morita (1998).

A decomposição do problema original em problemas menores e mais simples facilita sua resolução. Assim, critérios gerais estarão em níveis mais altos da hierarquia; já as alternativas, ficarão abaixo do último nível de sub-critérios. Dessa forma, é possível focalizar cada parte e o problema como um todo, obtendo prioridades pela comparação paritária baseada em dados existentes, conhecimento e experiência do tomador de decisão. Saaty (1980) e Morita (1998) apresentam o método de análise hierárquica em detalhes.

Em linhas gerais, o AHP executa um procedimento em que os critérios de um nível da hierarquia são comparados par-a-par. Os valores obtidos com a avaliação são inseridos em uma matriz quadrada (matriz de julgamento), repetindo-se este passo para todos os elementos

do nível, com respeito a todos os outros de um nível acima. A seguir, estes valores são convertidos em um vetor de prioridades, que indica a importância relativa de cada critério ou sub-critério, estabelecendo quais são os mais importantes.

A verificação da consistência das preferências é um importante passo para garantir, por exemplo, que se o critério A tem fraca importância sobre o B que tem fraca importância sobre C; então, A deve ter, pelo menos, forte importância sobre C. Para tanto, são calculados o maior autovalor, o índice de consistência e a razão de consistência.

A classificação final é feita pela multiplicação dos pesos das alternativas pelos pesos dos critérios. O *software* de simulação com maior pontuação é o que melhor atendeu às características desejáveis.

2.1.4. Método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação (HLUPIC e MANN, 1995)

Hlupic e Mann (1995) desenvolveram uma aplicação para auxiliar a seleção de *softwares* de simulação composta por uma base de dados criada com o Microsoft Access 1.1 (sistema de gerenciamento de bancos de dados relacionais) associada a uma interface implementada em Visual Basic 3.0 (ambiente para desenvolvimento criado pela Microsoft que utiliza o Visual Basic, uma linguagem de programação orientada a eventos).

A partir do trabalho publicado por Hlupic (1993), foram selecionados cerca de 40 critérios para avaliar as características gerais, os aspectos visuais e de codificação, a eficiência, os assistentes de modelagem, os recursos para testes nos modelos, a entrada e saída de dados, a compatibilidade com outros *softwares*, os recursos para a realização de experimentos, as ferramentas estatísticas e as características técnicas e financeiras (*apud* HLUPIC e MANN, 1995).

Considerando os critérios selecionados, as informações pertinentes foram cadastradas no banco de dados, sendo identificados cerca de 20 *softwares*. Os autores destacaram que a aplicação desenvolvida não avaliava a qualidade dos critérios, ou seja, somente verificava se estes foram atendidos pelos *softwares* de simulação cadastrados.

A aplicação implementada oferece ao usuário um conjunto de menus com opções; assim, é possível selecionar os critérios que devem ser satisfeitos pelos *softwares* de simulação. Por meio desses dados, os critérios são divididos em dois conjuntos: o primeiro contém as características chamadas gerais, tais como tipo de *software*, custo, tipo de simulação, entre outras; o segundo grupo é formado pelos demais critérios especificados pelo usuário. O mecanismo de seleção procura, inicialmente, os *softwares* que atendem ao primeiro conjunto de características; dentre os que passarem por este primeiro filtro, é realizada uma nova busca pelos critérios do segundo grupo.

Concluída a escolha dos critérios, o usuário deve acionar o mecanismo de busca através do menu principal, que apresentará um resumo com os critérios selecionados. Após a confirmação das informações, a aplicação solicitará a priorização dos critérios, segundo sua importância: alta, média ou baixa; ao classificá-los, a pontuação 1,5, 1,0 ou 0,5, respectivamente, será atribuída a cada um deles.

Com base nos dados coletados, será realizada a busca no banco de dados e apresentada, quando existir, uma lista com os *softwares* de simulação que satisfazem os critérios selecionados (classificada segundo a priorização estabelecida). O usuário pode, ainda, visualizar uma lista com sugestões alternativas, composta por *softwares* que atendem, minimamente, às características gerais.

2.1.5. Critérios para avaliação e seleção de *softwares* de simulação

(NIKOUKARAN, HLUPIC e PAUL, 1998)

Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) apresentaram diversos critérios para avaliação de *softwares* de simulação de eventos discretos estruturados hierarquicamente em sete categorias principais:

- Critérios do fornecedor;
- Critérios de desenvolvimento do modelo e entrada;
- Critérios de execução;
- Critérios de animação;
- Critérios de eficiência e teste;
- Critérios de saída;
- Critérios do usuário.

Segundo os autores, a utilização de critérios para avaliação de *softwares* de simulação é essencial para a seleção da melhor opção disponível no mercado. Assim, tornando mais ágil a aprendizagem e o teste dos recursos dos *softwares*, pode-se reduzir o tempo gasto com a atividade de seleção e contribuir diretamente para a diminuição dos custos envolvidos.

As tabelas 8 a 14, a seguir, apresentam os critérios organizados segundo as sete categorias propostas. Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) destacam ainda a criticidade desse número, pois a definição de muitas categorias dificulta a atribuição dos critérios a uma única; por outro lado, poucas categorias também inviabilizam a separação dos critérios segundo sua natureza.

Tabela 8. Critérios do fornecedor para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios do fornecedor
<i>Pedigree</i>
Histórico do fornecedor, tempo no mercado, outros produtos
Documentação
Manuais, tutoriais, exemplos
Suporte
Treinamento, atualizações, suporte técnico e grupos de discussão
Facilidade de pré-venda
Versão para demonstração, demonstração <i>on site</i>

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 9. Critérios de desenvolvimento para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de desenvolvimento do modelo e entrada
Biblioteca com módulos reutilizáveis
Construção do modelo
Ferramentas gráficas (<i>mouse</i> , teclado, <i>scanner</i> , <i>touch screen</i> , entre outras)
Através de código
Incorporação ou junção de modelos (<i>merging</i>)
Assistentes para modelagem (caixas de diálogo e desenvolvimento modularizado)
Modelagem hierárquica
Formato lógico
Roteamento condicional
Distribuições estatísticas
Padrão, definida pelo usuário e gerador de números aleatórios
Aspectos de codificação
Ferramentas e utilitários para codificação
Interface com outras linguagens
Acesso ao código fonte do <i>software</i> de simulação
Gerador de programas
Variáveis globais e atributos
Funções internas (<i>built in</i>) e definidas pelo usuário
Políticas de fila (FIFO, LIFO, entre outras)
Entrada de dados
A partir de arquivos externos
Coleta de dados automática
Modo <i>batch</i> e interativo de entrada de dados
Verificador de consistência de dados de entrada

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 10. Critérios de execução para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de execução
Controle da velocidade
Múltiplas rodadas
Execução <i>batch</i> automática
Período de aquecimento
Capacidade de reinicialização de estatísticas
Inicialização em estado não vazio (estabelecendo valores iniciais)
Paralela
Modelos executáveis

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 11. Critérios de animação para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de animação
Integração da animação (integrada ou <i>software</i> externo)
Biblioteca de ícones
Quantidade
Qualidade das imagens
Editor de ícones
Possibilidade de personalização dos ícones existentes
Importação a partir de <i>softwares</i> CAD, <i>bitmap</i> , entre outros
Execução da animação
Modo de animação concorrente
Modo de animação pós-simulação
Habilitar/desabilitar
Controle da velocidade
Suavização dos movimentos
Rotação e troca dos ícones durante a execução
<i>Layout</i> da tela
Possibilidade de impressão
Edição, Virtual, Múltiplos
Ferramentas para desenvolvimento da animação

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 12. Critérios de eficiência e teste para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de eficiência e teste
Rastreamento
Armazenamento dos valores instantâneos de variáveis (<i>snapshots</i>)
Execução passo-a-passo
Validação e verificação
Teste de validação do modelo
Pré-analisador
Ajuda e tutorial <i>on-line</i>
Verificador de erros <i>on-line</i> e qualidade das mensagens de erro
Depuração interativa
Verificador de lógica
Relógio reverso (<i>backward clock</i>)
Interação com modelo em execução
Multitarefa
Pontos de parada (<i>break points</i>)
Gerador de modelo conceitual
Limites
Tamanho do modelo, número de elementos, número de ícones
Características de exibição na tela

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 13. Critérios de saída para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios de saída
Disponibilização (<i>delivery</i>)
Arquivo (periódico ou não), impressão e interface com outros <i>softwares</i>
Relatório
Padrão e personalizado
Banco de dados
Armazenamento, recuperação e manipulação
Integração
Planilhas eletrônicas, sistemas de gerenciamento de banco de dados, <i>softwares</i> estatísticos, processadores de texto
Análise
Intervalo de confiança
Teste de aderência
Teste de hipótese
Interpretação e autocorrelação
Projeto experimental
Otimização
Regressão
Gráficos
Histogramas, barras, entre outros (estáticos ou dinâmicos)

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Tabela 14. Critérios do usuário para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios do usuário	
Tipo de simulação	Discreta, contínua, ambas
Orientação	Aplicações específicas Genéricas
<i>Hardware</i>	Micro computadores, mini computadores, <i>mainframes</i> , <i>workstations</i> Portabilidade
Dispositivo de segurança	
Sistema operacional	DOS, UNIX, OS/2, Windows 98, Windows NT, Windows 3.1 Compatibilidade
Versão para rede	
Financeiro	Preço Requerimentos Manutenção Treinamentos
Experiência necessária	Em simulação Com o <i>software</i>
Classe do <i>software</i>	Simulador Linguagem de simulação Linguagem de programação genérica

Fonte: Adaptado de Nikoukaran, Hlupic e Paul, 1998.

Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) ressaltam que os critérios abordados devem ser utilizados para a obtenção de uma visão geral dos *softwares* e como guias para teste e avaliação de suas características; estes não permitem identificar o nível de satisfação do usuário em relação ao atendimento de suas expectativas. Assim, seu trabalho limita-se à apresentação e à discussão de uma lista de critérios e de sua organização hierárquica; os autores sugerem a utilização do AHP para a seleção do *software* de simulação – Saaty (1980) e Morita (1998) descrevem esse método detalhadamente.

2.1.6. Método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação

(TEWOLDEBERHAN, VERBRAECK, VALENTIN e BARDONNET, 2002)

Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnnet (2002) apresentaram um método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos organizado em duas fases: a primeira fase reduz rapidamente uma lista com diversas opções para somente algumas; na segunda fase, são confrontadas as necessidades do projeto com os recursos oferecidos pelos *softwares* que passaram pela fase inicial. Os autores utilizaram a estrutura hierárquica de critérios apresentada por Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) e destacaram ainda a necessidade da constante interação entre as equipes de seleção do *software*, simulação e gerência, e os fornecedores dos *softwares* em todas as fases da atividade de seleção.

2.1.6.1. Primeira fase: Verificação das características

Nesta fase, os autores sugerem a criação de uma lista com as características que devem ser satisfeitas e a verificação de quais *softwares* de simulação de eventos discretos atendem a esta lista. Os seguintes passos guiam esta fase:

- **Identificação de requisitos e visão (*Vision and requirement identification*):** A identificação da visão global da equipe de simulação para o futuro próximo é fundamental para o levantamento das características que devem ser suportadas pelos *softwares* de simulação (áreas de aplicação atual e futura, tipos de produtos e serviços, tipos de clientes, processos de negócios, recursos desejados, restrições encontradas no *software* em uso etc.). Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e

Bardonnet (2002) recomendam a aplicação de questionários, a realização de *workshops*, *brainstormings*, entrevistas, entre outras técnicas nesta fase.

- **Extração de critérios (*Criteria extraction*):** Baseada na identificação da visão global e em fatores complementares (opiniões de especialistas em simulação, clientes, projetos de pesquisa, Literatura, entre outros), a extração de critérios deve ser conduzida pela equipe de seleção de *software* com o auxílio da equipe de simulação.
- **Atribuição de pesos aos critérios (*Criteria weighing*):** Considerando o grau de importância, devem ser atribuídos pesos a cada um dos critérios; por exemplo, estes podem variar entre 1 (menos importante) e 5 (mais importante). Assim, os critérios eliminatórios (*hard criteria*), ou seja, aqueles que devem ser atendidos, e os não-eliminatórios (*soft criteria*), são obtidos a partir dos pesos atribuídos.
- **Identificação das características do *software* (*Characteristics of discrete-event simulation software identification*):** Neste passo, inicialmente devem ser coletados os *softwares* de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado. A seguir, devem ser identificadas as características de cada um deles; para tanto, os fornecedores devem encaminhar mais informações sobre o *software* (a equipe de seleção pode enviar questionários para explorar detalhes de suas características), versões para demonstração podem ser experimentadas (por meio da construção e teste de pequenos modelos), artigos de pesquisa e especialistas em simulação podem ser consultados.
- **Filtro e classificação dos *softwares* de simulação (*Screening and ranking the simulation software*):** Após a identificação das características de cada um dos *softwares*, já é possível eliminar da lista de potenciais candidatos àqueles que não atendem aos critérios eliminatórios. A seguir, os *softwares* que passarem por este

filtro inicial devem ser classificados segundo os critérios não-eliminatórios, para tanto:

- Uma pontuação deve ser definida e atribuída a todos os *softwares* de simulação (para cada critério): por exemplo, o valor 1, se este atender ao critério não-eliminatório ou, 0, se em caso contrário.
- Multiplicar o peso de cada critério pela pontuação atribuída no item anterior;
- Para cada *software* de simulação, somar todos os pontos obtidos e classificá-lo segundo a pontuação total. Somente as primeiras 10 opções devem ser selecionadas para a segunda fase do método de avaliação e seleção. Segundo os autores, a escolha de 10 *softwares* restringe o domínio de busca, mantendo-o ainda representativo.

Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002) destacam que a classificação realizada na primeira fase somente verifica se os *softwares* de simulação atendem aos critérios, ou seja, ela não considera a qualidade destes. O objetivo desta primeira fase é a seleção de 10 opções para um estudo mais detalhado; assim, não é possível afirmar que o *software* melhor classificado será escolhido após o término de todas as etapas do método de seleção.

2.1.6.2. Segunda fase: Verificação da qualidade

Nesta fase, os *softwares* selecionados na etapa anterior são avaliados segundo a qualidade de suas características. Os passos a seguir guiam esta fase:

- **Seleção de critérios (*Criteria selection*):** Baseada nas informações obtidas na primeira fase deste método, em *brainstormings* com todos os participantes

envolvidos na avaliação dos *softwares* e nas opiniões da equipe de seleção, os critérios mais importantes devem ser selecionados para a avaliação da qualidade de sua implementação nos *softwares*, segundo as aplicações que serão desenvolvidas.

- **Atribuição de pesos aos critérios (*Criteria weighing*):** Analogamente ao procedimento realizado na fase anterior, pesos devem ser atribuídos aos critérios selecionados.
- **Elaboração de estudo de caso (*Designing a case study*):** O desenvolvimento de um pequeno estudo de simulação (para um caso típico), utilizando cada um dos *softwares* classificados, pode auxiliar na avaliação dos critérios definidos no primeiro passo desta fase.
- **Execução de experimentos (*Conduct experiments*):** Realizados durante a modelagem do estudo de caso, todos os experimentos devem utilizar os mesmos conjuntos de dados e distribuições de probabilidades; assim, os resultados obtidos para os diferentes *softwares* poderão ser analisados e comparados. Segundo os autores, os fornecedores podem ser envolvidos nesse passo, visto que podem contribuir mostrando a forma mais eficiente de modelar o estudo de caso, utilizando seu *software*.
- **Coleta de informações adicionais (*Gather additional information*):** Informações adicionais (limitações dos *softwares*, vantagens, desvantagens, entre outras) podem ser coletadas a partir de artigos de pesquisa e de contato com especialistas em cada um dos *softwares* de simulação avaliados.
- **Classificação dos *softwares* (*Ranking of software*):** Considerando os resultados obtidos com a realização dos experimentos e as informações adicionais coletadas, os *softwares* devem ser classificados conforme o procedimento a seguir:

- Inicialmente, uma pontuação deve ser definida e atribuída a todos os *softwares* de simulação (para cada critério): por exemplo, em uma escala com 4 níveis, 3 indicaria “Bom”, 2 atribuiria o conceito “Suficiente” e 1 classificaria como “Insuficiente”; por fim, 0 significaria que o critério não foi atendido;
- Multiplicar o peso de cada critério pela pontuação atribuída;
- Para cada *software* de simulação, somar todos os pontos obtidos e classificá-lo segundo a pontuação total. A opção com maior pontuação pode ser considerada melhor que as demais, visto que a comparação foi baseada na percepção da qualidade do *software* de simulação em um estudo de caso, representativo para um problema típico.
- **Análise de sensibilidade (*Sensitivity analysis*):** Após a escolha do *software* de simulação, deve ser realizada a análise de sensibilidade para avaliar a robustez do resultado obtido. Os autores sugerem:
 - Analisar a sensibilidade à atribuição de pesos aos critérios;
 - Analisar a sensibilidade à limitação dos critérios (considerar somente os mais importantes);
 - Analisar a sensibilidade à pontuação atribuída aos *softwares*.

Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnnet (2002) aplicaram esse método em uma grande empresa prestadora de serviços e obtiveram resultados promissores. Ainda, segundo os autores, é possível aplicá-lo em diferentes domínios de problemas, visto que os procedimentos são suficientemente genéricos.

2.1.7. Comparação entre os métodos revisados

A tabela 15, a seguir, apresenta resumidamente as principais características dos métodos para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos abordados neste capítulo. Foi possível identificar uma significativa diferença entre o número de critérios utilizados para avaliação dos *softwares*: Davis e Williams (1994) consideraram somente 14; já Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998), propuseram a avaliação de 93 critérios. Verificou-se que os trabalhos que apresentavam poucos critérios avaliavam superficialmente ou parcialmente os *softwares* de simulação; já um número maior de critérios, permitia uma cobertura mais ampla e detalhada das características em avaliação. Observou-se também que, basicamente, todos os autores abordaram questões ligadas às características gerais do *software*, entrada de dados, desenvolvimento do modelo, saída de dados, eficiência e teste, execução e suporte técnico. Assim, algumas categorias citadas nos trabalhos revisados poderiam ser reclassificadas como sub-grupos dessas 7 categorias principais.

Com relação à seleção, os autores sugeriram que esta fosse organizada em 2 fases. Na primeira, procuraram avaliar todos os *softwares* disponíveis, segundo os critérios mais importantes, como características indispensáveis aos modelos de simulação que seriam desenvolvidos, restrições técnicas e financeiras. Dessa forma, a partir de uma lista com algumas dezenas de opções, seriam eleitos entre 3 e 10 *softwares* para avaliação e análise detalhada na próxima fase.

Na segunda fase, a maior parte dos autores utilizou o método de atribuição de pesos e pontuação para tomada de decisão por múltiplos critérios; entretanto, Davis e Williams (1994) destacaram a fragilidade desse método no tratamento da inconsistência existente no julgamento humano e sugeriram a utilização do método de análise hierárquica (AHP), visto que este permite a identificação e correção de inconsistências durante a avaliação comparativa entre as características de cada *software* de simulação de eventos discretos.

Tabela 15. Resumo dos métodos revisados para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos.

Característica	Banks (1991)	Davis e Williams (1994)	Hlupic e Mann (1995)	Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998)	Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnnet (2002)
Critérios	36 (agrupados em 5 categorias)	14 (agrupados em uma única categoria)	40 (agrupados em 11 categorias)	93 (agrupados em 7 categorias)	65 (agrupados em 7 categorias)
Categorias	Entrada; Processamento; Saída; Suporte; Custo	Características gerais	Características gerais; Aspectos visuais; Codificação; Eficiência; Assistentes; Recursos para testes; Entrada/Saída; Compatibilidade; Recursos para experimentos; Ferramentas estatísticas; Características técnicas e financeiras	Fornecedor; Desenvolvimento do modelo/Entrada; Execução; Animação; Eficiência e teste; Saída; Usuário	Fornecedor; Desenvolvimento do modelo/Entrada; Execução; Animação; Eficiência e teste; Saída; Usuário
Seleção	Em 2 fases: 1º) Atribuição de pesos e pontuação 2º) Estudo detalhado para as 3 melhores opções (maior pontuação)	Em 2 fases: 1º) Seleção dos <i>softwares</i> que atendem as restrições de <i>software</i> , <i>hardware</i> e suporte local 2º) Uso do método de análise hierárquica (AHP)	Em 2 fases: 1º) Seleção dos <i>softwares</i> que atendem as características gerais 2º) Classificação segundo a prioridade atribuída aos critérios	Os autores não abordam; sugerem avaliar o método de análise hierárquica (AHP)	Em 2 fases: 1º) Atribuição de pesos e pontuação (eliminação dos <i>softwares</i> que não atendem aos critérios eliminatórios) 2º) Atribuição de pesos e pontuação (verificação de qualidade)

Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnnet (2002) propuseram, ainda, adicionalmente em relação aos demais trabalhos, a análise de sensibilidade à limitação dos critérios em avaliação (considerando somente os mais importantes), aos pesos e às pontuações atribuídas, buscando verificar a robustez dos resultados obtidos frente às possíveis inconsistências geradas pela avaliação subjetiva das características dos *softwares*.

2.1.8. Normas para aquisição de *softwares*

Nesta seção serão apresentadas as normas IEEE 1062 (IEEE 1062, 1998) e NBR ISO/IEC 12207 (NBR ISO/IEC 12207, 1998) que elencam as práticas recomendadas para aquisição de *softwares*, especialmente *softwares* de prateleira modificáveis (MOTS) e por encomenda (FD); também será abordada a NBR ISO/IEC 12119 (NBR ISO/IEC 12119, 1998) que trata do teste e dos requisitos de qualidade para os *softwares* de prateleira (COTS).

2.1.8.1. IEEE 1062: Prática recomendada para aquisição de *software* (IEEE 1062, 1998)

O IEEE 1062 (1998) apresenta um conjunto de práticas recomendadas para aquisição de *software*, para qualquer tipo de plataforma computacional, independente de seu tamanho, complexidade ou criticidade. Entretanto, esta norma é mais adequada para a aquisição de ***software de prateleira modificável*** ou MOTS (*Modified off the Shelf Software*) – *software* personalizável, adaptado pelo fornecedor para atender à necessidade específica do adquirente – e ***software por encomenda*** ou FD (*Fully Developed*) – desenvolvido a partir de um conjunto de requisitos obtidos pelo fornecedor junto ao adquirente, não sendo, portanto, recomendável aplicá-la para aquisição de *softwares* de prateleira ou COTS.

Segundo o IEEE 1062 (1998), o ciclo de vida da aquisição de um *software* compreende o período que se inicia com a decisão de adquiri-lo e termina quando o *software* tem seu uso descontinuado. Tipicamente, as fases de planejamento, contratação,

implementação, aceitação e acompanhamento formam este ciclo. O resultado ou saída de uma fase alimenta a entrada da fase seguinte, conforme pode ser observado na tabela 16.

Tabela 16. Fases do processo de aquisição de *software*.

Fase	Início da fase	Término da fase	Passo no processo de aquisição de <i>software</i>
Planejamento	Desenvolvimento da idéia	Liberação do pedido de proposta	1. Planejamento da estratégia organizacional 2. Implementação do processo organizacional 3. Definição dos requisitos de <i>software</i>
Contratação	Pedido de proposta liberado	Assinatura do contrato	4. Identificação de fornecedores potenciais 5. Preparação dos requisitos de contrato 6. Avaliação das propostas e seleção do fornecedor
Implementação do produto	Contrato assinado	Recebimento do <i>software</i>	7. Gerência do desempenho do fornecedor
Aceitação do produto	<i>Software</i> recebido	Aceitação do <i>software</i>	8. Aceitação do <i>software</i>
Acompanhamento	<i>Software</i> aceito	Descontinuação do <i>software</i>	9. Utilização do <i>software</i>

Fonte: Adaptado do IEEE 1062, 1998.

Os passos definidos pela norma devem ser seguidos para se assegurar que os *softwares* com alto potencial de qualidade sejam avaliados no processo de aquisição, assim:

- 1. Planejamento da estratégia organizacional:** Revisa os objetivos do adquirente e desenvolve uma estratégia para a aquisição do *software*;
- 2. Implementação do processo organizacional:** Estabelece um processo de aquisição de *software* que satisfaz às necessidades da organização, obtendo um *software* com qualidade;

3. **Definição dos requisitos de *software*:** Define o *software* que deve ser adquirido e prepara os planos com os requisitos de qualidade e manutenção para sua aceitação;
4. **Identificação de fornecedores potenciais:** Seleciona os candidatos potenciais que demonstrarão e apresentarão a documentação de seu *software*, além das propostas formais. A não observação de qualquer uma destas ações resultará na rejeição do fornecedor potencial;
5. **Preparação dos requisitos de contrato:** Descreve a qualidade do trabalho a ser feito em termos de desempenho e critérios de aceitação; nesse passo, também são preparadas as condições contratuais que estabelecem a previsão de pagamento;
6. **Avaliação das propostas e seleção do fornecedor:** Avalia as propostas recebidas, selecionando o fornecedor e negociando o contrato;
7. **Gerência do desempenho do fornecedor:** Monitora o progresso do trabalho do fornecedor para garantir o cumprimento do contrato e aprova as partes executadas do trabalho;
8. **Aceitação do *software*:** Executa testes e estabelece um processo para garantir que todas as não conformidades sejam corrigidas e que todos os critérios de aceitação sejam atendidos;
9. **Utilização do *software*:** Acompanha e analisa o processo de aquisição para avaliar as práticas do contrato, registrar as lições aprendidas e avaliar a satisfação do usuário com o produto. Os dados de desempenho do fornecedor devem ser armazenados.

O sucesso na aquisição de um *software* ou serviço correlato de alta qualidade somente é alcançado, quando as seguintes ações são executadas (IEEE 1062, 1998):

- a. Identificação das características de qualidade necessárias para atingir os objetivos do adquirente;
- b. Inclusão de considerações de qualidade nas atividades de planejamento, avaliação e aceitação;
- c. Implementação de uma estratégia organizacional para a aquisição de *software*;
- d. Estabelecimento de um processo de aquisição de *software* baseado nos nove passos sugeridos pela norma;
- e. Utilização prática do processo.

2.1.8.2. NBR ISO/IEC 12207: Tecnologia da Informação – Processos de ciclo de vida de *software* (NBR ISO/IEC 12207, 1998)

A NBR ISO/IEC 12207 (1998) estabelece uma estrutura comum de processos para ser utilizada como referência em negócios relacionados à criação e à gerência de *software*, abrangendo desde sua concepção até sua descontinuidade. Cabe destacar que ela não foi concebida para *softwares* de prateleira (COTS).

A norma utiliza uma terminologia própria e agrupa os processos de ciclo de vida de *software* em três classes, que representam sua natureza. Cada processo é definido em termos de suas atividades; cada atividade é formada por um conjunto de tarefas. Os seguintes processos a compõem (NBR ISO/IEC 12207, 1998):

- **Processos fundamentais:** aquisição, fornecimento, desenvolvimento, operação e manutenção;
- **Processos de apoio:** documentação, gerência de configuração, garantia de qualidade, verificação, validação, revisão conjunta, auditoria e resolução de problemas;
- **Processos organizacionais:** gerência, infra-estrutura, melhoria e treinamento.

A NBR ISO/IEC 12207 (1998) também descreve o **processo de adaptação**, que contém as atividades básicas para adaptá-la a uma organização ou projeto específico. Assim, a adaptação consiste na supressão de processos, atividades ou tarefas não aplicáveis.

Neste trabalho, somente serão abordados os processos diretamente relacionados à aquisição de *softwares*, ou seja, os processos de aquisição e fornecimento (visão complementar que orienta os fornecedores em relação ao atendimento das necessidades do adquirente).

O processo de aquisição é iniciado com a necessidade de se adquirir um sistema, produto ou serviço de *software*; a seguir, a continuidade é dada pela preparação e emissão do pedido de proposta, seleção do fornecedor e gerenciamento do processo de aquisição, pela aceitação do sistema, produto ou serviço de *software*. As seguintes atividades compõem esse processo:

1. Iniciação;
2. Preparação do pedido de proposta;
3. Preparação e atualização do contrato;
4. Monitoramento do fornecedor;
5. Aceitação e conclusão.

Já o processo de fornecimento, pode ser iniciado tanto pela decisão do atendimento a um pedido de proposta, quanto pela assinatura de um contrato para fornecimento de um sistema, produto ou serviço de *software* para um adquirente. A seguir, a continuidade é dada pela determinação dos procedimentos e recursos necessários para gerenciar e garantir o projeto, incluindo o desenvolvimento e a execução dos planos do projeto até a entrega do sistema, produto ou serviço de *software* ao adquirente. As atividades a seguir compõem este processo:

1. Iniciação;
2. Preparação da resposta;
3. Contrato;
4. Planejamento;
5. Execução e controle;
6. Avaliação e revisão;
7. Entrega e conclusão.

Segundo a SOFTEX (2005), a NBR ISO/IEC 12207 (1998) é considerada de grande importância para o processo de aquisição de *software*, porque reconhece as distintas funções existentes para os compradores e fornecedores. Assim, esta norma deve ser considerada por estas partes quando existir entre elas um acordo ou contrato que defina o desenvolvimento, a manutenção ou a operação de um sistema de *software*.

2.1.8.3. NBR ISO/IEC 12119: Tecnologia da Informação – Pacotes de *software* – Teste e requisitos de qualidade (NBR ISO/IEC 12119, 1998)

A NBR ISO/IEC 12119 (1998) é aplicável a *softwares* de prateleira (COTS), estabelecendo os requisitos de qualidade e as instruções de como testar um **pacote de *software*** (conjunto completo e documentado de programas fornecido a diversos usuários para uma aplicação ou função genérica) em relação a estes requisitos.

O *software* estará em conformidade com esta norma, quando atender aos seguintes requisitos:

- **Descrição do produto:** Documento que apresenta as propriedades de um pacote de *software*, auxiliando os potenciais compradores na avaliação da adequação do

produto antes de sua aquisição. Assim, ela deve fornecer informações sobre a documentação do usuário, **programas** (unidades sintáticas que estão em conformidade com as regras de uma linguagem de programação particular, composta de declarações, comandos ou instruções necessárias para executar uma certa função ou tarefa, ou ainda solucionar um problema) e, se existirem, sobre os dados;

- **Documentação do usuário:** Formada por um conjunto completo de documentos, disponível na forma impressa ou não, fornecida para a utilização de um *software*, sendo também parte integrante do produto. Contém todas as informações necessárias para o uso do *software*, descrevendo as funções apresentadas na descrição do produto e todas as funções do programa que os usuários tenham acesso;
- **Programa e dados:** Formado pelo conjunto completo de programas de computador e dados fornecidos para aplicação do *software*.

A norma também especifica as instruções para o teste do produto em relação aos requisitos de qualidade descritos anteriormente. Para tanto, a seguinte estrutura deve ser observada:

- Pré-requisitos de teste;
- Atividades de teste;
- Registros de teste;
- Relatório de teste;
- Teste de acompanhamento.

2.1.8.4. Aplicabilidade das normas revisadas

As normas IEEE 1062 (1998) e NBR ISO/IEC 12207 (1998) têm grande importância porque apresentam as práticas recomendadas para aquisição de *softwares*, auxiliando os envolvidos neste processo a definir seus papéis e reconhecendo as distintas funções existentes para compradores e fornecedores; dessa forma, elas proporcionam às organizações que as utilizam uma melhor compreensão das atividades a serem executadas.

Essas normas são amplamente utilizadas em diversos países (SOFTEX, 2005). Entretanto, elas são mais adequadas para regulamentar a aquisição de *software* de prateleira modificável (MOTS) ou *software* por encomenda (FD), porque, além de guiar questões ligadas ao planejamento da estratégia da organização, à definição de requisitos, à identificação de fornecedores, entre outras, as normas IEEE 1062 (1998) e NBR ISO/IEC 12207 (1998) dão ênfase ao gerenciamento do desempenho do fornecedor, monitorando o progresso de seu trabalho e tratando com especial atenção da elaboração de documentação, gerência de configuração, garantia de qualidade, verificação, validação, entre outros aspectos ligados ao monitoramento das atividades realizadas durante o processo de desenvolvimento.

Esses aspectos não são relevantes para aquisição de *softwares* de prateleira (COTS), visto que estes já estão comercialmente disponíveis, com um conjunto de características funcionais e de qualidade pré-definidas pelo fornecedor. Esse tipo de *software* geralmente é bem definido em termos de documentação e suas capacidades e limitações também são amplamente conhecidas; seu bom desempenho pode ser demonstrado pelo número de usuários que o utilizam. Além disso, o fornecedor de *softwares* de prateleira não está disponível para modificá-lo às necessidades de um cliente específico (IEEE 1062, 1998).

Já a NBR ISO/IEC 12119 (1998), estabelece os requisitos de qualidade e as instruções de como testar *softwares* de prateleira (COTS) em relação a estes requisitos. Segundo a norma, esse tipo de *software* deve dispor da descrição do produto, da documentação do usuário, de programas e de dados.

Os requisitos estabelecidos contemplam essencialmente a avaliação da descrição e da documentação do *software*, abordando a identificação da descrição do produto, os dados do fornecedor, as tarefas que podem ser executadas, os requisitos de *hardware* e *software*, a interface com outros produtos, os itens a serem entregues, a instalação, o suporte, a manutenção, as declarações sobre as funcionalidades (visão geral das funções, valores-limite e segurança), as declarações sobre usabilidade etc. As instruções para teste consistem, basicamente, na verificação da conformidade com os requisitos de qualidade. Desse modo, esta norma pode auxiliar o usuário ou comprador em potencial na avaliação da adequação do *software* de prateleira frente as suas necessidades.

2.2. Aplicações da simulação de eventos discretos

Segundo Harrell *et al.* (1997), provavelmente, as indústrias de manufatura foram as maiores usuárias da simulação, principalmente devido à facilidade de uso e à pressão competitiva pela eficiência operacional. Entretanto, a evolução e a flexibilidade dos novos *softwares* de simulação permitiram a modelagem de outras funções associadas à indústria, como movimentação de material, distribuição, armazenagem, atividades de manutenção, entre outras.

Assim, enquanto a popularidade da simulação crescia nos meios produtivos, outras áreas passaram a experimentá-la. Shannon (1992), Banks, Carson e Nelson (1996), Harrell *et al.* (1997), Banks (1998), Law e Kelton (2000) e Ören (2002), apresentaram aplicações da simulação em diversas áreas, como manufatura, sistemas de manuseio de materiais,

engenharia civil, indústria automobilística, transportes, saúde, área militar, serviços, sistemas de comunicação e de computação, programação de atividades, alocação de pessoal, reengenharia de processos de negócios, sistemas humanos, entre outras.

Na próxima seção, serão abordadas aplicações recentes da simulação de eventos discretos para análise de problemas ligados especificamente à área de sistemas logísticos. Será também apresentado um quadro resumo com os *softwares* utilizados em cada uma destas aplicações, identificando-se os principais *softwares* comerciais de simulação.

2.2.1. Aplicações em operações logísticas complexas

Entre as aplicações da simulação em operações logísticas complexas, encontra-se o trabalho de Barnard e Van Haaften (2000), que desenvolveram um modelo para analisar todas as etapas do processo de caracterização e certificação de tambores com resíduos radioativos, que seriam transportados do *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory* para o *Waste Isolation Pilot Plant* (ambos nos Estados Unidos da América). Os resultados produzidos pelo modelo auxiliaram o planejamento estratégico e tático, tendo como principais objetivos o cumprimento do cronograma e do orçamento propostos.

Standridge e Heltne (2000) optaram por um ambiente modular de simulação (MSE – *Modular Simulation Environment*) para a análise de capacidades logísticas durante o desenvolvimento de estratégias alternativas de operação e investimento em equipamentos, para uma indústria química, suportando a tomada de decisão estratégica e tática.

Díaz e Pérez (2000) utilizaram *softwares* de simulação e otimização para avaliar gargalos e suas causas, na complexa operação logística de colheita de cana-de-açúcar de um dos maiores produtores mundiais de açúcar, com enfoque especial ao transporte da cana; os autores também buscaram a otimização dos recursos alocados ao sistema.

2.2.2. Aplicações em cadeia de suprimentos

Segundo Schunk e Plott (2000), a simulação é uma das melhores ferramentas para condução de estudos na cadeia de suprimentos. Tal afirmação é confirmada por diversos trabalhos publicados recentemente que utilizaram a simulação de eventos discretos para fornecer subsídios à tomada de decisão.

Similar ao trabalho apresentado por Barnard e Van Haaften (2000), Trone, Guerin e Clay (2000) também desenvolveram um modelo de simulação para análise do processamento, transporte e remoção de resíduos radioativos situados em instalações espalhadas pelos Estados Unidos da América para o *Waste Isolation Pilot Plant* (localizado no mesmo país). O modelo buscava avaliar os impactos da limitação dos recursos de transporte e as opções da logística da cadeia de suprimentos de resíduos radioativos.

Parsons e Siprelle (2000) utilizaram a simulação para estudar a junção das cadeias de suprimentos de duas grandes empresas do setor alimentício que seguiam filosofias de operação diferentes: uma era baseada em centros de distribuição e, a outra, na entrega direta a partir da planta industrial. Os resultados produzidos permitiram avaliar qual tipo de filosofia deveria ser mantida e auxiliaram o dimensionamento dos centros de distribuição para acomodar os novos produtos no sistema.

Jain *et al.* (2001a) e Jain *et al.* (2001b) desenvolveram um modelo de simulação para analisar os impactos decorrentes de mudanças nos processos e da implantação de um *software* de gestão da cadeia de suprimentos em uma operação envolvendo 27 países e incluindo máquinas, equipamentos eletrônicos, roupas, alimentos, remédios, entre outros. Indicadores como o nível de serviço e de itens em estoque foram utilizados para quantificar os resultados obtidos, permitindo observar que a melhoria na precisão da previsão de demanda traria mais economia que mudanças na automação dos processos. Jain (2004) estendeu este trabalho, utilizando a simulação para estudar as compensações (*tradeoffs*) entre nível de serviço,

estoque e tempo de espera (entre o pedido e a entrega de produtos), de forma a melhorar o desempenho global da cadeia de suprimentos.

Jain, Choong e Lee (2002) apresentaram um modelo da operação de uma fábrica de montagem de computadores e de sua cadeia de suprimentos, buscando aumentar a competitividade desta empresa por meio da integração da fábrica, das operações logísticas e das regras de negócio (*business processes*) que orientavam estas operações. Um novo paradigma de modelagem, conhecido como **fábrica virtual** (JAIN, CHOONG, AYE e LUO, 2001), foi estendido e utilizado para comparação de diferentes filosofias de operação da cadeia de suprimentos e para auxiliar na determinação de parâmetros que permitiriam atingir as metas globais de desempenho.

Anderson e Morrice (2002) conceberam um modelo de simulação para cadeias de suprimentos seriais em dois estágios, comumente encontradas nas áreas de serviços e indústrias de manufatura que produzem somente após a confirmação dos pedidos (*make-to-order*). A estratégia utilizou modelos de fila e os resultados obtidos suportaram argumentos para melhorar a coordenação entre os estágios da cadeia.

Linn, Chen e Lozan (2002) optaram por desenvolver um modelo distribuído para um sistema de transporte internacional utilizando o RTI (*Run Time Infrastructure*), baseada na HLA (*High Level Architecture*) desenvolvida pelo DMSO (*Defense Modeling and Simulation Office*), e o DMS Adapter (*Distributed Manufacturing Simulation Adapter*). O principal objetivo dos autores era construir um modelo que pudesse ser facilmente integrado com outros *softwares* de simulação através da Internet.

2.2.3. Aplicações em sistemas de distribuição e transporte

Diversos trabalhos relacionados à análise e avaliação de sistemas de distribuição e transporte, utilizando a simulação de eventos discretos, podem ser encontrados na Literatura.

Takakuwa, Takizawa, Ito e Hiraoka (2000) desenvolveram um modelo de simulação para um armazém de distribuição não automatizado com o objetivo de avaliar seu desempenho. Já Burnett e LeBaron (2001) apresentaram um modelo que permitia a determinação de diversos parâmetros e cenários para validar o projeto, determinar os recursos necessários e capacidades operacionais da rede de centros de distribuição automatizados do canal de comércio eletrônico de um grande operador logístico.

Hugan (2001) utilizou a simulação para avaliar o tráfego interno em uma planta automobilística da General Motors, nos Estados Unidos da América, que seguia o modelo de controle de estoques *Just-In-Time* (JIT). Esse projeto possibilitou determinar a melhor rota interna para cada tipo de produto entregue (diminuindo o congestionamento na planta); estimar o tempo médio gasto por cada tipo de item, desde a entrada na planta até a doca de descarregamento; determinar o tamanho da área de espera dos caminhões e o número de recursos necessários para suportar o recebimento de materiais.

Gue e Kang (2001) apresentaram um estudo do comportamento e desempenho de diferentes configurações de filas em estágio (*staging queue*), tipicamente encontradas no manuseio de materiais (por exemplo, na área de embarque em armazéns, onde os *pallets* são enfileirados próximos às docas) e em sistemas de transporte (como nas empresas locadoras de carros); nesse tipo particular de fila, as entidades não podem se mover autonomamente.

Kuo, Chen, Selikson e Lee (2001) descreveram uma aplicação da simulação de eventos discretos no estudo do fluxo contínuo de materiais em uma planta de manufatura química. O modelo permitiu determinar as características das operações logísticas (como o número e a capacidade dos silos, a ocupação dos equipamentos, entre outras) garantindo a continuidade da produção.

Franzese e Joshi (2002) estudaram o efeito das informações sobre o congestionamento nas rotas ótimas realizadas por veículos entre centros de distribuição e lojas varejistas. O

modelo de simulação desenvolvido buscava melhorar os resultados obtidos com *softwares* comerciais de roteirização, agregando informações em tempo real sobre as condições de tráfego nas rotas de distribuição. Já Xu, Hancock e Southworth (2003), apresentaram um modelo para estudar os efeitos das estratégias logísticas e da tecnologia de informação em tempo real no transporte de fretes. Nesse modelo, as rotas também poderiam ser alteradas, baseadas em condições reais do tráfego sobre a rede, suportando a escolha da melhor rota em tempo real.

Giacaman, Medel e Tabilo (2002) desenvolveram um modelo para analisar o comportamento do sistema de manuseio de materiais de uma mina de exploração de nitrato, localizada no Chile. A simulação permitiu investigar diversos cenários, como mudanças no tamanho da frota de carregamento e de transporte do material extraído, e prever o efeito dessas alterações sobre a produção mensal.

2.2.4. Aplicações em planejamento e controle de estoque e produção

Entre as aplicações da simulação no planejamento e controle de estoque e produção, encontra-se o trabalho de Macro e Salmi (2002), que descreveu um modelo de simulação para um armazém com capacidade limitada e perspectiva de crescimento da demanda nos próximos cinco anos. O estudo permitiu verificar a eficiência dos métodos de armazenamento, testando diversas configurações com diferentes tipos de *rack*, quantidades e *layout* dos *pallets*. Além disso, foram também avaliadas: a utilização e a capacidade do armazém para cada um dos cenários; a limitação de recursos e equipamentos; e o desempenho dos métodos de separação de itens para preenchimento dos pedidos.

Garcia, Silva e Saliby (2002) utilizaram a simulação para validar uma expressão analítica utilizada no cálculo do estoque de segurança em um sistema de revisão periódica, considerando a aleatoriedade nos erros de previsão de demanda e no atendimento dos pedidos

de reposição. Os autores constataram que a simulação é uma ferramenta bastante útil para avaliação do estoque de segurança (quando se deseja alcançar um determinado nível de serviço) e para validação de expressões analíticas, que são mais fáceis de implementar (comparadas à simulação) e, na prática, mais utilizadas em problemas industriais.

Mane, Nahavandi e Zhang (2002) apresentaram um modelo de simulação de eventos discretos para uma empresa de peças automotivas, que planejava montar e entregar 40 tipos diferentes de assentos (classificados em três grupos principais) em uma linha de produção, segundo a estratégia *Just-In-Time* (JIT). Nessa aplicação, foram avaliados dois algoritmos diferentes de sequenciamento para modelos mistos (*mixed model algorithms*), com o objetivo de determinar a sequência que maximizaria a eficiência operacional, balanceando a linha e aumentando a utilização dos recursos, evitando gargalos em centros produtivos e, conseqüentemente, aumentando a velocidade da linha.

2.2.5. Aplicações em transporte aéreo

Segundo Rosenberger *et al.* (2000), freqüentemente os modelos utilizados no planejamento do transporte aéreo não consideram explicitamente o comportamento estocástico destas operações, pois, na maioria das vezes, são empregados métodos de otimização, que resultam em discrepâncias entre o planejado e o realizado. Assim, estes autores desenvolveram um modelo de simulação, para uma empresa que opera vôos domésticos diariamente, que permitia o tratamento da aleatoriedade sobre suas operações. O modelo auxiliaria o estudo e a elaboração do planejamento, por meio da avaliação da alocação dos recursos humanos e das políticas de recuperação (*recovery policies*), que são a forma como a empresa reagiria a eventos não programados (como alterações climáticas ou problemas mecânicos). Diferentes políticas de recuperação resultariam em operações com desempenhos diferentes.

Joustra e Van Dijk (2001) utilizaram a simulação para avaliar alternativas nos métodos de *check-in* do *Amsterdam Airport Schiphol* (em Amsterdam, Holanda), testando diferentes regras operacionais, como postos de atendimento comum e dedicado, com horário fixo ou dinâmico de abertura e fechamento (em função do número de passageiros em fila). Também foi analisada a capacidade de atendimento, diante da expectativa de crescimento do número de passageiros, para manutenção do nível de serviço oferecido. Em todos os cenários, foram registrados para cada voo, o tempo em fila, o tamanho da fila, o número de postos abertos e a sua ocupação. Já Verbraeck e Valentin (2002), optaram por criar um conjunto de componentes ou blocos reutilizáveis, que formariam a base de uma ferramenta mais flexível para a construção de modelos e a análise da capacidade e da operação de terminais aéreos.

Kiran, Cetinkaya e Og (2000) descreveram em seu trabalho os resultados da simulação de um novo terminal internacional no *Istanbul Ataturk Airport* (em Istambul, Turquia), utilizada para avaliar o fluxo de passageiros e de aeronaves, os gargalos operacionais e a capacidade do sistema. O estudo buscou validar o projeto desse novo terminal e verificar seu comportamento durante os horários com maior fluxo de passageiros (horário de pico).

Hafizogullari, Chinnusamy e Tunasar (2002) apresentaram os resultados da avaliação do fluxo de transferência de passageiros no *John F. Kennedy International Airport* (em Nova Iorque, Estados Unidos da América), um aeroporto concentrador (*hub*), que seria utilizado no projeto de novos terminais. Segundo os autores, com a tendência de operação no sistema *hub-and-spoke*, muitos passageiros precisam realizar pelo menos uma conexão antes de alcançar o destino final, ou seja, um grande número de passageiros realiza transferência entre voos. Dessa forma, surgiu a necessidade de um modelo que permitisse avaliar e determinar o tempo de conexão entre voos consecutivos, ao mesmo tempo que fossem minimizados o número de passageiros que perdem conexões e o tempo máximo de espera entre voos, diminuindo os custos operacionais e o tempo médio de viagem.

Bazargan, Fleming e Subramanian (2002) conceberam um modelo para avaliar a capacidade das pistas do *Philadelphia International Airport* (na Filadélfia, Estados Unidos da América) em diferentes *layouts*, estimando para cada cenário sua eficiência em termos da funcionalidade do projeto, sensibilidade à tecnologia, melhoria dos procedimentos e utilização total da capacidade potencial. Já Boesel e Bodoh (2004), estudaram os impactos de mudanças no tráfego aéreo decorrentes da abertura de uma nova pista no *Detroit Metropolitan Wayne County Airport* (em Michigan, Estados Unidos da América), paralela às três atualmente em operação. Por meio da análise dos resultados do modelo de simulação, foi possível estudar as alterações no espaço aéreo necessárias para acomodar os pousos e decolagens, estimando os atrasos, os custos e o aumento na capacidade total do aeroporto.

Fellman, DeArmon e Connolly (2004) procuraram avaliar os benefícios do planejamento progressivo (*progressive planning*) no gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, utilizado para resolver problemas de desbalanceamento entre a demanda e a capacidade dos recursos operacionais.

2.2.6. Aplicações em transporte rodo-ferroviário

Segundo Banks (1998), um número crescente de empresas do setor de transporte utiliza a simulação de eventos discretos para modelar e estudar diversas condições de suas operações. Geralmente, ela é utilizada por essas empresas para avaliar estratégias que permitam melhorar o desempenho operacional de equipamentos (HOMER, KEANE, LUKIANTSEVA e BELL, 1999).

Kulick e Sawyer (2001) desenvolveram um modelo de simulação para um terminal intermodal de cargas a fim de avaliar e explorar áreas onde a eficiência poderia ser melhorada, uma vez que sua operação estava com desempenho abaixo do esperado. Os autores analisaram as restrições de capacidade, visto que o *layout*, recursos humanos e

materiais, questões operacionais, entre outras, poderiam influenciar no processamento do terminal. Procuraram avaliar também se os problemas de capacidade poderiam ser resolvidos pelo uso eficiente de pessoal e equipamentos, além de determinar o ponto onde o aumento de recursos humanos não proporcionaria um aumento na produtividade.

Franzese, Fioroni e Botter (2003) utilizaram a simulação para estudar a Estrada de Ferro Vitória – Minas (que conecta os estados brasileiros Espírito Santo e Minas Gerais), sistema de transporte ferroviário gerenciado pela Companhia Vale do Rio Doce, modelando a malha em ciclo fechado. O projeto permitiu avaliar o impacto de diversas variáveis no desempenho do sistema, tais como o tamanho das composições, as consequências de alterações físicas na linha férrea, a influência de falhas e acidentes, entre outras.

Guttkuhn *et al.* (2003) apresentaram os resultados de seu trabalho na área de transporte ferroviário de cargas, que avaliava os impactos das mudanças na programação de pessoal operacional e verificava o desempenho dessas medidas. Os autores também analisaram novas políticas e regras operacionais para alocação de pessoal, as restrições e os gargalos da operação; investigaram e diagnosticaram problemas, além de estudar as alterações no tráfego para implementação de respostas reativas à programação corrente.

Schulze, Lemessi e Filippi (2001) conceberam um modelo para estimar informações básicas, como a frequência e tempo em viagem, número de veículos, número de clientes transportados e receita esperada, para introdução do serviço noturno de ônibus-táxi no centro histórico de Roma, na Itália, (*taxi-bus system* é um sistema por meio do qual os usuários fazem solicitações de transporte de um ponto específico de embarque para um ponto específico de desembarque; também conhecido como *dial-a-ride*). Neste trabalho, os autores procuraram integrar o aspecto da otimização ao modelo de simulação, buscando minimizar o tempo em viagem.

2.2.7. Aplicações em transporte marítimo

A simulação de eventos discretos também pode ser encontrada em aplicações no sistema de transporte marítimo. Merrick, Van Dorp, Mazzuchi e Harrauld (2001) desenvolveram um modelo para uma grande empresa desse setor que combinou simulação, julgamento de especialistas e dados históricos para estimar a contribuição de fatores de riscos em acidentes, principalmente após a incorporação de novos modelos de embarcações à frota. Segundo os autores, a simulação foi necessária para capturar o aspecto dinâmico desses fatores, como interações de tráfego e condições climáticas, e identificar os cenários dominantes de potenciais acidentes e suas conseqüências. O estudo possibilitou avaliar a segurança do sistema e o nível de risco, além de recomendar diversas medidas para priorizar sua redução, melhorando o nível de serviço oferecido aos clientes.

Van Asperen, Dekker, Polman e De Swaan Arons (2003) investigaram o impacto de diferentes processos de chegada de embarcações na eficiência do processo de carga e descarga do *Port of Rotterdam* (em Rotterdam, Holanda). O projeto permitiu analisar comparativamente as estatísticas de tempo de espera em fila e flutuações do estoque em tanques de uma planta química para cada um dos processos de chegada. Três tipos foram estudados: estoque controlado (*stock-controlled*), chegadas eqüidistantes de embarcações e chegadas seguindo a distribuição de Poisson.

2.2.8. Softwares de simulação utilizados nas aplicações

As tabelas 17 a 23 mostram o resumo das aplicações da simulação de eventos discretos apresentadas nas seções anteriores, identificando os autores, o objetivo do modelo e o *software* utilizado. ORMS *Today* (2003) abordou em detalhes as principais características e os fornecedores dos *softwares* citados a seguir.

Tabela 17. Resumo das aplicações em operações logísticas complexas.

Operações logísticas complexas		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	Software utilizado
Barnard e Van Haaften (2000)	Auxiliar na conclusão do projeto conforme cronograma e orçamento estimados	Extend (Imagine That, Inc.)
Standridge e Heltne (2000)	Analisar as capacidades logísticas	Desenvolvido em Visual SLAM e C com interface para alguns componentes comerciais
Díaz e Pérez (2000)	Auxiliar na alocação de recursos e na prevenção de gargalos	Arena (Rockwell Software)

Tabela 18. Resumo das aplicações em cadeia de suprimentos.

Cadeia de suprimentos		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	Software utilizado
Trone, Guerin e Clay (2000)	Avaliar os impactos de recursos limitados e opções da logística da cadeia de suprimentos	Extend (Imagine That, Inc.)
Parsons e Siprelle (2000)	Estudar a junção de cadeias de suprimentos com diferentes filosofias de operação	Extend (Imagine That, Inc.)
Jain et al. (2001a e 2001b) e Jain (2004)	Analisar os impactos das mudanças nos processos e da implantação de um <i>software</i> de gestão	Arena (Rockwell Software)
Jain, Choong e Lee (2002)	Integrar a operação da fábrica, as operações logísticas e regras de negócio	eM-Plant (Tecnomatix Technologies, Inc.)
Anderson e Morrice (2002)	Melhorar a coordenação entre os estágios de cadeias de suprimentos seriais	Arena (Rockwell Software)
Linn, Chen e Lozan (2002)	Construir um modelo distribuído para integração com outros <i>softwares</i> de simulação através da Internet	Arena (Rockwell Software)

Tabela 19. Resumo das aplicações em sistemas de distribuição e transporte.

Sistemas de distribuição e transporte		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	Software utilizado
Takakuwa, Takizawa, Ito e Hiraoka (2000)	Avaliar o desempenho de um centro de distribuição não automatizado	Arena (Rockwell Software)
Burnett e LeBaron (2001)	Validar o projeto, determinando os recursos necessários e as capacidades operacionais	AutoMod (Brooks Automation)
Hugan (2001)	Analisar o tráfego interno de uma planta automotiva	AutoMod (Brooks Automation)
Gue e Kang (2001)	Estudar o comportamento e o desempenho de diferentes configurações de filas em estágio	Arena (Rockwell Software)
Kuo, Chen, Selikson e Lee (2001)	Determinar parâmetros das operações logísticas para garantir a continuidade da produção	eM-Plant (Tecnomatix Technologies, Inc.)
Franzese e Joshi (2002)	Estudar os efeitos de informações sobre o tráfego nas rotas obtidas com <i>softwares</i> de roteirização	Desenvolvido em Fortran (conhecido como OREMS)
Xu, Hancock e Southworth (2003)	Estudar os efeitos de informações em tempo real e de estratégias logísticas no transporte de fretes	Desenvolvido em GISDK (conhecido como DyFTS)
Giacaman, Medel e Tabilo (2002)	Prever o efeito de mudanças na frota de manuseio de materiais sobre a produção mensal	Desenvolvido em GPSS/H

Tabela 20. Resumo das aplicações em planejamento e controle de estoque e produção.

Planejamento e controle de estoque e produção		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	Software utilizado
Macro e Salmi (2002)	Analisar a eficiência dos métodos de armazenamento e separação de itens	ProModel (ProModel Solutions)
Garcia, Silva e Saliby (2002)	Validar uma expressão analítica para cálculo do estoque de segurança	Desenvolvido em MS-Excel e @Risk
Mane, Nahavandi e Zhang (2002)	Avaliar diferentes algoritmos de sequenciamento para modelos mistos	Quest (Delmia Corp.)

Tabela 21. Resumo das aplicações em transporte aéreo.

Transporte aéreo		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	Software utilizado
Rosenberger <i>et al.</i> (2000)	Auxiliar no planejamento da alocação de recursos humanos e políticas de recuperação	Os autores não citam o <i>software</i>
Joustra e Van Dijk (2001)	Estudar alternativas nos métodos de <i>check-in</i> e a capacidade de atendimento	Enterprise Dynamics (Incontrol Enterprise Dynamics)
Verbraeck e Valentin (2002)	Criar um conjunto de blocos reutilizáveis para modelagem e análise de terminais aéreos	eM-Plant (Tecnomatix Technologies, Inc.)
Kiran, Cetinkaya e Og (2000)	Validar o projeto do novo terminal	ProModel (ProModel Solutions)
Hafizogullari, Chinnusamy e Tunasar (2002)	Analisar e determinar o tempo de conexão entre vôos consecutivos	Arena (Rockwell Software)
Bazargan, Fleming e Subramanian (2002)	Avaliar a capacidade de diferentes <i>layouts</i> de pista em um aeroporto	Desenvolvida em TAAM
Boesel e Bodoh (2004)	Estudar os impactos de mudanças no tráfego aéreo decorrentes da abertura de uma nova pista	Desenvolvida em SLX
Fellman, DeArmon e Connolly (2004)	Verificar os benefícios do planejamento progressivo no gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo	Os autores não citam o <i>software</i>

Tabela 22. Resumo das aplicações em transporte rodo-ferroviário.

Transporte rodo-ferroviário		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	<i>Software</i> utilizado
Kulick e Sawyer (2001)	Identificar áreas em um terminal intermodal onde a eficiência possa ser melhorada	Arena (Rockwell Software)
Franzese, Fioroni e Botter (2003)	Avaliar os impactos de diversas variáveis no desempenho do sistema	Arena (Rockwell Software)
Guttkuhn et al. (2003)	Estudar os impactos de alterações na programação de pessoal operacional	Desenvolvido em Delphi (conhecido como TrainSim)
Schulze, Lemessi e Filippi (2001)	Estimar informações básicas para introdução de um serviço noturno de ônibus-táxi	Desenvolvido em SLX

Tabela 23. Resumo das aplicações em transporte marítimo.

Transporte marítimo		
Autores	Objetivo do projeto de simulação	<i>Software</i> utilizado
Merrick, Van Dorp, Mazzuchi e Harrald (2001)	Avaliar a segurança e o nível de risco do sistema	Os autores não citam o <i>software</i>
Van Asperen, Dekker, Polman e De Swaan Arons (2003)	Investigar os impactos de diferentes processos de chegada de embarcações	Enterprise Dynamics (Incontrol Enterprise Dynamics)

2.3. Conclusões do capítulo

A difusão da simulação de eventos discretos como ferramenta para modelagem e análise de problemas em diferentes áreas despertou o interesse em diversas empresas especializadas no desenvolvimento de *softwares*. Atualmente, dezenas de *softwares* de simulação de eventos discretos estão disponíveis no mercado (estes denominados *softwares* de prateleira ou COTS), com as mais variadas características e custos. Assim, é fundamental a aplicação de um método para avaliação e seleção do *software* que melhor atenda ao projeto de simulação com o menor custo total associado.

Dessa forma, foram revisados diversos trabalhos que apresentaram métodos para avaliação e seleção de *softwares*. Entretanto, não foi possível observar uma padronização em relação à terminologia utilizada para identificar os critérios e as categorias que devem ser avaliadas. Alguns autores utilizaram um número reduzido de critérios, não permitindo uma visão ampla e detalhada das características dos *softwares* de simulação. Todavia, pode-se notar que os critérios citados nos trabalhos revisados poderiam ser agrupados em 7 categorias principais. É relevante também destacar que, independentemente da estrutura em que estes forem organizados, ela deve suportar modificações, dado o aspecto dinâmico da evolução da tecnologia e da constante atualização dos *softwares* de simulação. Em relação à seleção, os autores sugeriram a utilização do método de atribuição de pesos e pontuação ou do método de análise hierárquica (AHP).

Dentre as normas que regulamentam o processo de aquisição de *softwares*, pode-se constatar que, embora as normas IEEE 1062 e NBR ISO/IEC 12207 tenham grande importância nesse contexto, elas não são adequadas para tratar da aquisição dos *softwares* de simulação de eventos discretos abordados neste trabalho, visto que estes são classificados como *softwares* de prateleira (COTS), ou seja, aqueles que estão comercialmente disponíveis.

Já a NBR ISO/IEC 12119, que estabelece os requisitos de qualidade e instruções para teste de *softwares* do tipo COTS, contempla essencialmente a avaliação de sua descrição e documentação e a verificação da sua conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos. A proposta apresentada por essa norma está fora do escopo deste trabalho, que tem por objetivo principal apresentar o método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos. Entretanto, pode ser interessante aplicá-la para avaliar o *software* selecionado pelo método, pois esta pode complementá-lo e auxiliar na seleção de *software* que atenda tanto aos critérios definidos para modelagem de aplicações em sistemas logísticos, quanto aos requisitos de qualidade estabelecidos pela norma.

Concorrentemente à difusão da simulação de eventos discretos e ao desenvolvimento dos métodos para avaliação e seleção de *softwares*, houve um significativo crescimento na área de sistemas logísticos, que passou a utilizar a simulação para análise de capacidades, avaliação de impactos de mudanças nos processos, alocação de recursos limitados, determinação de parâmetros das operações para garantir a continuidade da produção, validação de projetos, entre outras aplicações.

Assim, ao mesmo tempo em que foi observado o extensivo uso da simulação de eventos discretos em inúmeros problemas ligados a sistemas logísticos, não foi identificado nos trabalhos revisados nenhum método para avaliação e seleção de *softwares* voltados à análise de problemas nessa área; a maior parte dos estudos foi desenvolvida para avaliação e escolha de *softwares* para aplicações em áreas genéricas.

A identificação das características necessárias para a modelagem de aplicações em sistemas logísticos, bem como o uso de um método apropriado, poderiam tornar a avaliação e seleção de *softwares* de simulação mais eficaz e eficiente, pois a escolha de um *software* depende tanto do problema a ser resolvido e seus objetivos, quanto das características dos *softwares* disponíveis no mercado. Ou seja, após a caracterização do problema a ser resolvido,

neste caso pertencente à área de sistemas logísticos, um conjunto adequado de critérios pode ser criado para auxiliar na seleção do *software* de simulação que melhor atenda às necessidades do projeto com o menor custo total associado. O próximo capítulo descreverá detalhadamente o método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados ao desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos.

3. MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE *SOFTWARES* DE SIMULAÇÃO APLICADOS À ANÁLISE DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

Neste capítulo será descrito o método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos. Para facilitar a compreensão, o texto está organizado em duas seções principais: na primeira, são abordados os critérios para avaliação; já na segunda, é detalhado o procedimento para seleção.

Os critérios para avaliação dos *softwares* foram propostos com base nos trabalhos revisados de Banks (1991), Davis e Williams (1994), Hlupic e Mann (1995), Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998) e Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002). Foram incorporados, nesse conjunto, alguns critérios relevantes à modelagem e à análise de aplicações em sistemas logísticos, identificados a partir das características dos principais problemas pertinentes a esta área.

Já o procedimento para seleção de *softwares* de simulação foi baseado nos trabalhos desenvolvidos por Saaty (1980), Morita (1998) e Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002).

3.1. Critérios para avaliação dos *softwares* de simulação

O conjunto de critérios proposto foi dividido em 7 categorias, que procuram mapear as características desejáveis nos *softwares* de simulação de eventos discretos relevantes à análise de aplicações em sistemas logísticos. Serão apresentados 111 critérios organizados hierarquicamente; dentre estes, 19 incorporados com o objetivo de atender às necessidades específicas para o desenvolvimento de modelos de casos típicos em sistemas logísticos. A seguir, serão descritas as categorias:

- Características gerais;
- Entrada de dados;
- Desenvolvimento do modelo;
- Saída de dados;
- Eficiência e teste;
- Execução;
- Suporte técnico.

3.1.1. Características gerais

Para a avaliação das características gerais dos *softwares* de simulação devem ser considerados diversos critérios, tais como: a confiabilidade do fornecedor, procurando identificar outros *softwares*, casos de sucesso, tempo no mercado, principais clientes, profissionais que atuam na empresa, estrutura funcional (essencial para avaliar o atendimento e o suporte em atividades pré-venda e pós-venda); a portabilidade entre plataformas, ou seja, a possibilidade de execução do *software* em diferentes plataformas de *hardware*, como Intel, Sun Microsystems, Apple, entre outras; e a compatibilidade entre sistemas operacionais, permitindo ao usuário instalar o *software* em qualquer versão do Microsoft Windows, distribuições Linux, Mac OS, Solaris etc. O acesso ao código fonte do *software* de simulação também pode ser importante para o desenvolvimento de programas integrados, criando soluções personalizadas para problemas complexos.

É importante verificar se o *software* pode ser utilizado para simulação de eventos discretos, contínua ou ambos os tipos, suportando o tratamento de problemas com características distintas. Alguns *softwares* empregam dispositivos de segurança que limitam seu uso, como, por exemplo, a geração de licenças baseadas em informações coletadas diretamente no micro-computador em que será instalado (inconveniente, quando os recursos

financeiros para a aquisição de licenças são escassos; por outro lado, particularmente interessante quando se deseja restringir a sua utilização); outros, oferecem versões para redes de computadores, possibilitando a instalação em diversos micro-computadores e a execução simultânea limitada pelo número de licenças adquiridas. A conectividade com a Internet é essencial para o desenvolvimento de modelos de forma colaborativa, ou seja, entre equipes espalhadas por diferentes pontos geográficos.

Por fim, devem ser cuidadosamente analisados os diversos custos envolvidos, tais como: aquisição da licença; aquisição do *hardware* que suporte as especificações recomendadas; instalação do *software*, quando for necessária uma consultoria para personalização do sistema operacional em que este será executado (*setup* inicial); treinamento para a capacitação da equipe; manutenção e suporte técnico, tanto para o fornecimento de atualizações de versão, quanto para depuração de problemas nos modelos desenvolvidos.

A tabela 24 apresenta os critérios propostos para avaliação das características gerais dos *softwares* de simulação, voltados à modelagem de aplicações em sistemas logísticos.

Tabela 24. Características gerais para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação das características gerais
Confiabilidade do fornecedor
Portabilidade entre plataformas
Compatibilidade entre sistemas operacionais
Código fonte aberto
Tipo de simulação
Dispositivo de segurança
Versão para execução em redes
Conectividade com a Internet
Custos
Licença
<i>Hardware</i>
Instalação do <i>software</i>
Treinamento
Manutenção e suporte técnico

3.1.2. Entrada de dados

Os critérios relacionados a esta categoria são muito importantes, pois em geral, as aplicações em sistemas logísticos lidam com uma grande massa de dados. Assim, deve ser considerada a importação de dados a partir de arquivos texto, arquivos CSV (*Comma Separated Value* é um formato onde cada registro é identificado por uma única linha e os valores são separados por vírgulas; embora seja universal, suportado por diversas aplicações, esse formato não foi abordado nos trabalhos revisados), bancos de dados (a implementação da *Structured Query Language*, SQL, padrão para inúmeros sistemas de gerenciamento de bancos de dados relacionais, como o Microsoft SQL Server, Oracle, Sybase, IBM DB2, entre outros, possibilita a interação com esses sistemas e a exploração de diversos recursos), planilhas eletrônicas (*softwares* difundidos em pacotes de aplicativos como o Microsoft Office, Lotus, OpenOffice, StarOffice, entre outros) e arquivos XML (a adoção da *Extensible Markup Language* para o compartilhamento de informações está se tornando padrão para as novas aplicações, sendo portanto, relevante sua inclusão entre os critérios propostos), formatos que possibilitam a integração com os *softwares* disponíveis no mercado, sem a necessidade da criação de rotinas para exportação dos dados e conversão dos formatos.

A geração de estatísticas básicas dos dados, como o valor mínimo, o valor máximo, a média, a mediana, a moda, as separatrizes, a variância, o intervalo de confiança, entre outras, é essencial para a fase de preparação dos dados de entrada executada durante o desenvolvimento dos modelos de simulação (dessa forma, o critério foi também incorporado, pois somente é citado por outros autores na análise dos dados de saída); assim como os testes de aderência dos dados às distribuições de probabilidades (por exemplo, o teste *chi-quadrado* e o teste *kolmogorov-smirnov*), que permitem a configuração dos parâmetros do modelo para as distribuições teóricas e empíricas (quando os dados não aderem às distribuições teóricas).

O suporte à coleta automática de dados a partir de sistemas externos, bem como a interface com outros *softwares* de simulação são características importantes, visto que possibilitam a integração com outras aplicações em ambientes complexos; embora não contemplada pelos artigos revisados, a interface com outros *softwares* de simulação pode ser imprescindível para empresas que lidam com mais de um fornecedor. O *software* de simulação também deve permitir a entrada *batch* (em lotes) – ou seja, todos dados são agrupados e processados sequencialmente (uma única vez) – ou interativa – quando os dados podem ser coletados a qualquer momento. Por fim, é importante a verificação da consistência dos dados de entrada, evitando erros que possam ocorrer durante a execução do modelo, em decorrência de formatos ou dados incorretos.

Os critérios propostos para avaliação da entrada de dados nos *softwares* de simulação, utilizados na construção de modelos em sistemas logísticos, estão sumarizados na tabela 25.

Tabela 25. Critérios de entrada de dados para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação da entrada de dados
Importação de dados
Arquivos texto
Arquivos CSV ¹
Bancos de dados
Planilhas eletrônicas
Arquivos XML ¹
Geração de estatísticas dos dados ¹
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades
Coleta de dados automática a partir de sistemas externos
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação ¹
Modo de entrada de dados
<i>Batch</i> (em lotes)
Interativo
Verificação da consistência dos dados

¹Critério incorporado

3.1.3. Desenvolvimento do modelo

Diversos critérios devem ser considerados na avaliação das características dos *softwares* de simulação utilizados para o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos. Entre eles, o suporte às principais distribuições teóricas de probabilidades, como a Normal, Uniforme, Triangular, Exponencial, Lognormal, Erlang, Gama, Beta, Weibull e Poisson; o suporte à configuração da distribuição empírica, utilizada quando os dados não aderem às distribuições teóricas; a geração das sementes dos números aleatórios, pois a qualidade destas é fundamental para a execução das replicações nos experimentos realizados com os modelos, além da geração de números aleatórios que não se repetem ou formam ciclo após um número reduzido de iterações.

A integração com a animação é outra importante característica, pois permite visualizar e analisar os sistemas modelados, auxiliando na identificação e na correção de erros, para representação fidedigna ao sistema real em estudo; além disso, a avaliação das interações que ocorrem entre os sub-sistemas permite a melhor compreensão dos mesmos, a realização de estudos e a proposição de experimentos que possibilitem melhorar sua eficiência e eficácia. A animação é ainda utilizada com sucesso para exposição do modelo aos profissionais que tomam as decisões em qualquer nível, seja operacional, tático ou estratégico. Assim, devem ser avaliadas características como uma ampla biblioteca com ícones padrão (que representam objetos em diversas áreas, como cadeia de suprimentos, sistemas de distribuição, produção, estoque, transporte aéreo, transporte rodo-ferroviário, transporte marítimo, entre outras) e a possibilidade da inclusão de outros pelo usuário; a qualidade dos ícones disponíveis; a existência de editores que permitam a personalização e a importação de imagens geradas a partir de *softwares* como, AutoCAD (Autodesk), Corel Draw (Corel), Visio (Microsoft), Photoshop (Adobe), Gimp (*software* com licença pública), entre outros.

Já a importação de imagens para a composição do gráfico de fundo (*background*), permite o desenvolvimento de animações em um ambiente semelhante ao sistema real; assim, embora não tenha sido avaliada nos trabalhos revisados, esta é uma característica desejável. A implementação de editores para o *layout* da tela e de recursos amplamente utilizados – seleção de objetos, copiar e colar, a partir de processadores de texto, planilhas eletrônicas, editores de apresentações e gráficos, navegadores para acesso à Internet, entre outros – complementam esse critério e possibilitam maior flexibilidade ao usuário durante a criação do modelo.

A existência de uma interface gráfica para a construção dos modelos auxilia e aumenta a produtividade durante o desenvolvimento das aplicações, pois os usuários podem utilizar recursos difundidos, como copiar e colar, arrastar objetos, edição de propriedades, entre outros; evitando, na maioria das vezes, a necessidade da codificação em uma linguagem de programação; já a incorporação ou junção de modelos é particularmente útil nos casos em que uma aplicação previamente criada será incorporada por uma maior.

Entretanto, a implementação de assistentes para codificação é indispensável, pois ajudam o usuário a configurar parâmetros, como expressões matemáticas, distribuições de probabilidades e funções que permitem a utilização de estatísticas ligadas às filas, recursos, entidades, valores de variáveis e atributos. O desenvolvimento de modelos, por meio da codificação em uma linguagem criada pelo fornecedor do *software*, pode torná-los mais flexíveis, possibilitando a incorporação de novas características, a personalização das existentes e o acesso às funções indisponíveis através da interface gráfica (frequentemente, em sistemas complexos, os objetos padrão não atendem às necessidades dos sistemas que serão modelados); assim, é essencial que a sintaxe dessa linguagem seja consistente e sem ambigüidades.

A geração do código fonte pode ser interessante em casos particulares, pois possibilita modificações nos modelos de simulação desenvolvidos previamente com o auxílio da interface gráfica. A interface com linguagens de programação, como Java, Perl, Visual Basic, Pascal, C/C⁺⁺/C[#], Fortran, Assembly, entre outras, também aumenta a flexibilidade do *software* de simulação, permitindo a incorporação de novas características; embora, dependendo da linguagem utilizada, os programas não sejam tão eficientes, em relação ao tempo gasto com a implementação e o processamento, quanto àqueles gerados com a utilização da linguagem do fornecedor.

A disponibilidade de uma biblioteca com funções internas (*built in*) e a possibilidade da inclusão de outras definidas pelo usuário são características desejáveis, pois aumentam a eficiência durante o desenvolvimento dos modelos de simulação.

Variáveis globais e os atributos das entidades são essenciais para a codificação do modelo, pois simplificam a modificação de um mesmo valor configurado para diversos parâmetros, permitem o cálculo e a geração de estatísticas, as definições das regras de roteamento de entidades etc.

A possibilidade de desenvolvimento modularizado também é importante, pois permite a criação e a depuração de sub-modelos que podem ser conectados, formando um modelo mais complexo; a manutenção de uma biblioteca com módulos reutilizáveis implementados pelo usuário aumenta a eficiência e a produtividade durante a construção de aplicações que envolvam esses módulos, dado que já foram previamente testados.

É importante avaliar os objetos oferecidos para o desenvolvimento dos modelos de simulação. Alguns destes, ligados ao manuseio de materiais, tais como esteiras, robôs, guindastes, veículos guiados automaticamente, entre outros, podem ajudar durante o desenvolvimento de aplicações específicas encontradas em sistemas logísticos. Outros objetos, que implementam o agrupamento e separação de entidades também podem auxiliar a

modelagem de diversos casos típicos (por exemplo, peças de uma linha de produção que são agrupadas em *pallets* para o armazenamento e transporte, ou pedidos que são separados em ordens de produção), bem como aqueles que permitem a busca e a remoção das entidades em fila baseados em atributos, variáveis e em expressões que utilizem funções internas do *software* de simulação (possibilitando, por exemplo, modelar filas de caminhões onde aqueles que transportam produtos perecíveis têm maior prioridade, entre outras aplicações típicas); dessa forma, é relevante sua incorporação ao conjunto de critérios proposto.

A programação dos horários em que os recursos estão disponíveis e a chegada de entidades, assim como a configuração de falhas nos recursos, são extensivamente utilizadas no desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos, pois possibilitam a criação de modelos com comportamento semelhante ao sistema real (permitindo programar, respectivamente, os turnos em que os recursos estão disponíveis, o horário previsto para chegada de matérias-primas ou ainda, manutenções e falhas nos equipamentos); sendo, portanto, relevante sua inclusão entre os critérios a serem avaliados nos *softwares* de simulação.

A especificação dos custos envolvidos na alocação de processos, utilização dos recursos (custo por uso; custo por tempo utilizado; custo por tempo ocioso) e relacionados às entidades (custo inicial; custo de permanência no sistema, entre outros) é utilizada para calcular o custo total do sistema, freqüentemente realizado para diferentes cenários; embora importante para o desenvolvimento das análises financeiras, essa característica não foi abordada nos artigos revisados.

O roteamento condicional das entidades é uma característica indispensável, pois possibilita a configuração de diversas regras, considerando a disponibilidade de recursos, distribuições de probabilidades, políticas definidas pelo usuário, entre outras; dessa forma, é possível desenvolver um modelo que represente, por exemplo, uma linha de produção em que

as peças podem ser encaminhadas para duas máquinas: preferencialmente para a nova (mais eficiente) ou, quando esta estiver ocupada, para a antiga. Diferentes políticas para as entidades em fila – FIFO, LIFO, baseada em atributos, no tempo de permanência na fila, no tempo de permanência no sistema, entre outras – também são utilizadas em diversas aplicações em sistemas logísticos.

Entre os critérios relacionados à avaliação da animação, destaca-se a opção para habilitá-la ou desabilitá-la, pois dependendo do horizonte de tempo simulado e do número de replicações, é inviável a visualização da animação, dado que o tempo de execução é significativamente maior quando esta é utilizada; entretanto, também é importante oferecer ao usuário a possibilidade de configurar a execução da animação concorrente à simulação ou pós-simulação; o controle da sua velocidade é uma característica desejável, pois permite visualizar e acompanhar a execução passo-a-passo do modelo; o suporte às diferentes unidades de tempo e espaço evita os erros decorrentes de cálculos e conversões realizadas durante o desenvolvimento do modelo, sendo portanto, relevante sua inclusão entre os critérios propostos. A implementação de objetos que possibilitem a visualização da data e hora durante a animação, bem como os valores instantâneos das variáveis, funções internas e gráficos são critérios que também não foram citados pelos artigos revisados, embora freqüentemente utilizados durante a realização de estudos de simulação; devendo, dessa forma, serem incorporados ao conjunto de critérios. Por fim, o suporte à animação tridimensional pode enriquecer a visualização da aplicação implementada por meio do *software* de simulação.

A tabela 26 apresenta os critérios para a avaliação das características oferecidas pelos *softwares* de simulação de eventos discretos para o desenvolvimento de modelos com aplicação em sistemas logísticos.

Tabela 26. Critérios de desenvolvimento para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação do desenvolvimento do modelo
<p> Suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades Gerador de números aleatórios Integração do modelo com a animação Ícones <ul style="list-style-type: none"> Biblioteca padrão e definida pelo usuário Qualidade Editor de ícones Importação a partir de outros <i>softwares</i> Gráfico de fundo (<i>background</i>) <ul style="list-style-type: none"> Importação de imagens¹ Editor de <i>layout</i> de tela Construção dos modelos <ul style="list-style-type: none"> Interface gráfica Incorporação ou junção de modelos Codificação <ul style="list-style-type: none"> Assistentes para codificação Programação utilizando a linguagem do fornecedor Sintaxe da linguagem do fornecedor Gerador de código fonte Interface com outras linguagens Biblioteca com funções internas (<i>built in</i>) e definidas pelo usuário Variáveis globais Atributos das entidades Opção para desenvolvimento modularizado Biblioteca com módulos reutilizáveis Objetos típicos para o desenvolvimento de modelos em sistemas logísticos <ul style="list-style-type: none"> Manuseio de materiais Agrupamento e separação de entidades¹ Busca e remoção de entidades em fila¹ Agendamento (<i>schedule</i>) <ul style="list-style-type: none"> Recursos e chegada das entidades¹ Falhas nos recursos (<i>downtimes</i>)¹ Configuração de custos¹ Roteamento condicional Diferentes políticas de fila Animação <ul style="list-style-type: none"> Configuração para habilitar/desabilitar Concorrente a simulação Pós-simulação Controle de velocidade Suporte às diversas unidades de tempo e espaço¹ Visualização da data/hora¹ Visualização dos valores instantâneos de variáveis e gráficos¹ Animação 3D </p>

¹Critério incorporado

3.1.4. Saída de dados

Para a avaliação das características relacionadas à saída de dados, devem ser verificados diversos critérios. Entre eles, a geração de relatórios padrão contendo estatísticas básicas, como o percentual de tempo inativo em decorrência de falhas no sistema; a utilização e a ociosidade dos recursos; o número de vezes que estes foram utilizados; o tempo em que as entidades permaneceram em fila, em atendimento e no sistema; o número de entidades em fila; o número de entidades geradas; os valores assumidos pelas variáveis, entre outras. A geração de relatórios personalizados pelo usuário também é importante, pois permite a seleção das estatísticas que serão disponibilizadas e a sua formatação (inclusão de cabeçalhos, logotipos da empresa, informações adicionais, imagens, gráficos etc.), criando documentos que podem ser apresentados diretamente aos profissionais responsáveis pelas decisões em qualquer nível, seja operacional, tático ou estratégico.

A exportação dos relatórios gerados em formatos compatíveis com processadores de texto, disponíveis em pacotes de aplicativos, como o Microsoft Office, OpenOffice, StarOffice, entre outros, é uma característica desejável, pois permite a edição dos mesmos. Já a geração de relatórios em arquivos PDF (*Portable Document Format*), aumenta sua portabilidade e possibilita seu compartilhamento através de redes de computadores e pela Internet. Embora não seja específica para aplicação somente em sistemas logísticos, a avaliação desses critérios foi incorporada por serem os formatos mais comuns.

É indispensável também a exportação dos dados em diversos formatos, permitindo a integração direta com outros *softwares*, sem a necessidade da criação de rotinas de conversão e interface. Assim, devem ser suportados arquivos texto, arquivos CSV (mesmo sendo um formato universal, suportado por diversas aplicações, este não foi abordado nos trabalhos revisados), bancos de dados (a implementação da linguagem SQL, padrão para inúmeros sistemas de gerenciamento de bancos de dados relacionais, como o Microsoft SQL Server,

Oracle, Sybase, IBM DB2, entre outros, possibilita a interação com estes sistemas e a exploração de diversos recursos), planilhas eletrônicas (em pacotes de aplicativos difundidos, como o Microsoft Office, Lotus, OpenOffice, StarOffice, entre outros) e arquivos XML (a adoção do XML para o compartilhamento de informações está se tornando padrão para as novas aplicações, sendo portanto, relevante sua adição entre os critérios a serem avaliados). Os dados podem ainda ser exportados em intervalos de tempo regulares definidos pelo usuário (periodicamente) ou ao término da execução do modelo de simulação.

A geração de estatísticas básicas dos dados de saída, como o valor mínimo, o valor máximo, a média, a mediana, a moda, as separatrizes, a variância, o intervalo de confiança, entre outras, facilita a análise dos resultados obtidos por intermédio do modelo de simulação; já os testes de aderência dos dados às distribuições de probabilidades (por exemplo, o teste *chi-quadrado* e o teste *kolmogorov-smirnov*), permitem comparar o desempenho do modelo em relação ao sistema real.

É indispensável a organização e a manutenção de um banco de dados com os resultados obtidos a partir da execução das replicações do modelo de simulação, assim como a possibilidade de recuperação e manipulação desses dados.

Adicionalmente, a integração com os *softwares* estatísticos disponíveis no mercado (como o Minitab, SAS, SPSS, entre outros) e a interface com outros *softwares* de simulação podem aumentar a flexibilidade das análises desenvolvidas com o modelo de simulação e enriquecer os resultados. A capacidade de geração de gráficos estatísticos, como histogramas, gráficos de barras e linhas, entre outros, a partir dos dados de saída do modelo de simulação, também facilita a avaliação dos resultados obtidos.

Por fim, é imprescindível que o *software* de simulação suporte a configuração de diversos parâmetros para a impressão do *layout* da tela, dos dados de saída e dos relatórios gerados, como a distância das margens, cabeçalhos e rodapés, o tamanho do papel, a

orientação do papel, o fator de escala, entre outros; a visualização prévia da impressão possibilita a verificação dos parâmetros ajustados; embora simples, esta é uma característica desejável, pois melhora a eficiência das tarefas desenvolvidas pelo usuário do *software* de simulação, sendo desta forma, também incluída aos critérios propostos.

Estão sumarizados na tabela 27 os critérios para avaliação da saída de dados, com enfoque ao desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos utilizando *softwares* de simulação de eventos discretos.

Tabela 27. Critérios de saída de dados para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação da saída de dados	
Relatórios	
Padrão	
Personalizado	
Exportação para processadores de texto ¹	
Exportação para arquivos PDF ¹	
Exportação de dados	
Arquivos texto	
Arquivos CSV ¹	
Bancos de dados	
Planilhas eletrônicas	
Arquivos XML ¹	
Periódica	
Geração de estatísticas dos dados	
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades	
Manutenção do banco de dados	
Integração com <i>softwares</i> estatísticos	
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação	
Geração de gráficos estatísticos	
Impressão	
Layout da tela	
Relatórios gerados	
Visualização prévia ¹	

¹Critério incorporado

3.1.5. Eficiência e teste

Os critérios desta categoria são essencialmente pertinentes à depuração de erros nas aplicações desenvolvidas. Assim, é indispensável verificar se o *software* de simulação permite o rastreamento da execução do modelo, gerando um arquivo onde são registradas todas as informações sobre o estado do sistema em cada evento ocorrido; dessa forma, é possível verificar como o modelo foi processado e identificar comportamentos anômalos em decorrência de erros nas lógicas criadas, condições não previstas, parâmetros e expressões configuradas, e valores de variáveis e atributos. A inserção de pontos de parada possibilita ao usuário estabelecer pontos intermediários, durante a execução do modelo, para verificação do estado do sistema e de resultados parciais, facilitando a depuração e a identificação de erros; já a inspeção dos valores instantâneos das variáveis, permite acompanhar as alterações em seus valores em cada evento. Finalmente, por meio da execução passo-a-passo, o usuário pode acompanhar o processamento do modelo evento-a-evento, analisando as lógicas executadas, a atualização de variáveis e atributos, o cálculo de expressões e estatísticas, entre outras informações do sistema.

A validação do modelo é muito importante, pois possibilita identificar erros comuns, como: desconexão entre os objetos; recursos não desalocados; inconsistência em valores e formatos de parâmetros, funções, variáveis e atributos; erros na identificação unívoca dos objetos; erros de sintaxe, entre outros. A verificação da lógica implementada pelo usuário na construção do modelo é outra característica essencial. O *software* de simulação deve implementar mecanismos de busca pelo objeto onde foi encontrado o erro, indicar sua natureza, permitir o acesso ao conteúdo de ajuda e sugerir a ação corretiva. A capacidade da geração do modelo conceitual fornece uma representação esquemática da lógica implementada pelo usuário, como, por exemplo, um diagrama de blocos, auxiliando também a verificação e validação do modelo de simulação.

Já o suporte à execução de múltiplas tarefas concorrentemente (multitarefa) aumenta a eficiência e a produtividade durante a realização de experimentos com o modelo de simulação, pois, por exemplo, é possível, enquanto estão sendo executadas as diversas replicações, a edição de outros cenários para a avaliação e a análise de propostas alternativas à atual estrutura do sistema.

Por fim, deve ser feita uma análise global das características oferecidas pelo *software* que facilitam a criação do modelo de simulação e que aumentam a eficiência e produtividade dos trabalhos, buscando a percepção do tempo necessário para sua construção (esse critério não foi abordado por nenhum dos trabalhos revisados, mas foi incluído devido à importância da avaliação global do *software* de simulação). A identificação de limites, como o número de entidades, recursos e processos, o número máximo de caracteres permitidos para nomes de variáveis, atributos e objetos, o número de variáveis e atributos, o número de replicações do modelo, entre outros, também deve ser considerado durante a avaliação dos *softwares*.

A tabela 28 apresenta os critérios propostos para avaliação da eficiência e teste nos *softwares* de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos.

Tabela 28. Critérios de eficiência e teste para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação da eficiência e teste
Depuração de erros
Rastreamento da execução
Inserção de pontos de parada
Inspeção dos valores instantâneos das variáveis
Execução passo-a-passo
Validação do modelo
Verificação da lógica
Gerador do modelo conceitual
Multitarefa
Tempo necessário para construção do modelo ¹
Limites do modelo

¹Critério incorporado

3.1.6. Execução

Nesta categoria devem ser avaliadas características essenciais à condução de experimentos com os modelos de simulação. Entre elas, o suporte às múltiplas replicações, cujo modelo é configurado para ser executado automaticamente diversas vezes, alterando unicamente a semente dos números aleatórios; é importante destacar que são esperadas diferenças significativas entre as replicações, devido ao comportamento aleatório do modelo; assim, devem ser considerados os resultados médios para as estatísticas e variáveis. Já a execução em modo *batch*, permite, além da configuração de múltiplas replicações, a programação de um conjunto de valores que serão assumidos pelas variáveis em cada rodada; esse modo é amplamente utilizado para realização de experimentos com o modelo, possibilitando a criação e avaliação de diferentes cenários.

A capacidade de reinicialização do sistema determina, entre cada replicação, a remoção de todas as entidades do modelo e a restauração dos valores padrão das variáveis globais e do estado do sistema; também é essencial a possibilidade de reinicialização das estatísticas coletadas entre as rodadas. Já a inicialização em estado não vazio permite a configuração dos valores iniciais para as variáveis globais e atributos, bem como a definição do estado das filas, recursos e entidades; por fim, a utilização do período de aquecimento é importante para que sejam eliminados os vestígios decorrentes da inicialização do modelo, retardando a coleta dos dados estatísticos até que o sistema entre em regime.

A interação com o usuário durante a execução pode ser interessante nos casos em que se procura avaliar o efeito de mudanças realizadas em um sistema em produção; dessa forma, pode-se interromper a execução do modelo em qualquer momento, implementar as mudanças no sistema e reiniciá-lo no mesmo estado em que foi interrompido. Essa característica permite também a modelagem de sistemas que utilizam informações em tempo real para a tomada de decisões.

A implementação da otimização da simulação também deve ser avaliada, pois esta permite não somente investigar e avaliar o comportamento dos sistemas modelados, mas identificar os cenários em que os resultados obtidos são maximizados ou minimizados.

Por fim, a geração de arquivos que possam ser executados em qualquer micro-computador compatível com a plataforma em que foi originalmente criado, independente do *software* de simulação, é outra importante característica que possibilita a visualização do modelo e dos relatórios gerados por qualquer usuário; a proteção do arquivo, de tal forma que sempre seja solicitada a autenticação do usuário para sua execução, é indispensável para impedir que usuários desautorizados tenham acesso às informações geradas.

Os critérios para avaliação da execução dos modelos implementados pelos *softwares* de simulação de eventos discretos estão sumarizados na tabela 29.

Tabela 29. Critérios de execução para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação da execução
Múltiplas replicações
Execução em modo <i>batch</i>
Capacidade de reinicialização do sistema e das estatísticas
Inicialização em estado não vazio
Período de aquecimento
Interação com o usuário durante a execução
Otimização
Geração de arquivos executáveis

3.1.7. Suporte técnico

Diversos critérios devem ser considerados para a avaliação do suporte técnico oferecido pelo fornecedor do *software* de simulação. Entre eles, a disponibilização do manual do usuário com informações atualizadas e detalhadas sobre a instalação e desinstalação do

software, especificações técnicas, principais menus e guia de referência para os comandos e funções; a publicação de tutoriais que explorem as características do *software* de simulação; e, a exemplificação do uso dos objetos, comandos e funções por meio de modelos simples. Serviços oferecidos *on-line*, ou seja, através da Internet, como a busca por mensagens de erro (disponibilizando informações detalhadas sobre as possíveis causas e sugestões de ações corretivas) e ajuda (por intermédio de salas eletrônicas de bate-papo, busca por palavras-chave em bases de conhecimento, FAQs – *Frequently Asked Questions*), podem auxiliar o usuário a resolver rapidamente os problemas mais comuns. O suporte técnico através de mensagens de correio eletrônico também possibilita o esclarecimento de dúvidas e facilita o contato com o usuário.

É interessante também verificar o tipo de experiência recomendada pelo fornecedor, tanto em relação ao conhecimento do *software* quanto aos conceitos pertinentes ao desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos. A aprendizagem do uso do *software* pode ser facilitada por uma interface gráfica amigável e intuitiva; pela disponibilização de material de ajuda, como o manual do usuário, tutoriais e exemplos de aplicações; e pelo suporte técnico rápido e preciso, seja *on-line* ou via central de atendimento telefônico. O oferecimento de treinamento especializado, dividido em módulos para usuários iniciantes, intermediários e avançados, é indispensável para os que desejam dominar a manipulação do *software* em pouco tempo.

A disponibilização de uma versão limitada para avaliação, que permita somente a construção de modelos simples, bem como a demonstração do *software* de simulação *on-site*, enriquecem a aprendizagem e o contato inicial com usuário, respectivamente.

Finalmente, deve ser avaliada a frequência das atualizações disponibilizadas pelo fornecedor do *software*, pois esta pode indicar sua preocupação com a correção de falhas (*bugs*) e incorporação de novas características; é indispensável a manutenção da

compatibilidade entre as aplicações desenvolvidas, ou seja, a versão atual do *software* deve ser capaz de editar e executar arquivos criados em qualquer versão anterior.

A tabela 30 apresenta os critérios para avaliação do suporte técnico proporcionado pelos fornecedores dos *softwares* de simulação de eventos discretos.

Tabela 30. Critérios de suporte técnico para avaliação de *softwares* de simulação.

Critérios para avaliação do suporte técnico
Documentação
Manual do usuário
Tutoriais
Exemplos por meio de aplicações
Mensagens de erro <i>on-line</i>
Ajuda <i>on-line</i>
Suporte técnico
Experiência necessária
Facilidade de aprendizagem
Treinamentos
Versão para avaliação
Demonstração <i>on-site</i>
Atualizações do <i>software</i>

3.2. Procedimento para seleção de *softwares* de simulação

O procedimento para seleção foi estruturado em duas fases. Na primeira, são desclassificados os *softwares* de simulação de eventos discretos que não suportam os critérios considerados essenciais para o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos. Já na segunda, procura-se avaliar a qualidade dos *softwares*, comparando seu desempenho por intermédio de aplicações práticas e experimentos; a seleção segue as premissas do método de análise hierárquica (AHP). Cada uma dessas fases possui um conjunto de passos que serão detalhados a seguir (figura 4).

Figura 4. Procedimento para seleção de *softwares* de simulação.

3.2.1. Primeira fase: verificação dos critérios essenciais

Nesta fase, inicialmente serão atribuídos pesos aos critérios propostos na seção 3.1, segundo sua importância às aplicações que serão desenvolvidas. Com base nesses critérios, os *softwares* serão avaliados e classificados; neste momento, busca-se unicamente excluir aqueles que não atenderem aos critérios definidos como essenciais para o desenvolvimento dos modelos de simulação para casos típicos em sistemas logísticos.

A classificação gerada é importante para assegurar que somente os *softwares* com maior pontuação sejam avaliados na próxima fase, independente do número de candidatos, dado que este pode variar de apenas dois a algumas dezenas. Assim, é possível restringir o número de *softwares* que serão avaliados detalhadamente, mantendo entretanto, um conjunto

representativo do grupo inicialmente identificado e assegurando a eficiência do método, visto que serão rapidamente definidos os *softwares* que passarão a fase seguinte.

As etapas abaixo, compõem a fase de verificação dos critérios essenciais:

1. Atribuição de pesos aos critérios;
2. Identificação dos *softwares* de simulação e suas características;
3. Classificação dos *softwares*.

Essas etapas foram baseadas no trabalho de Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002), que abordava também a identificação de requisitos e visão e a extração de critérios, etapas desnecessárias no contexto deste estudo, pois, devido à aplicação específica na seleção de *softwares* de simulação voltados à análise de sistemas logísticos, os critérios já foram propostos na seção 3.1.

3.2.1.1. Atribuição de pesos aos critérios

Para a atribuição dos pesos aos critérios apresentados na seção 3.1, deve-se avaliar a importância de cada um deles segundo as características do problema que será modelado e os objetivos que pretendem ser alcançados, identificando quais critérios são essenciais para o sucesso dessas tarefas e quais são dispensáveis.

Inicialmente, deve ser definido o conjunto de pesos. Assim, em uma escala com 5 níveis, ou seja, com valores variando entre 0 e 4, a atribuição de 0 indicaria que um critério é dispensável; já o valor 4, indicaria que ele é essencial para o desenvolvimento do modelo de simulação, devendo portanto, ser satisfeito pelos *softwares* classificados para a segunda fase. Os pesos intermediários podem ser utilizados para critérios desejáveis, que podem facilitar a modelagem e a depuração de erros, enriquecer a análise dos resultados obtidos e auxiliar na proposição de cenários e na condução de experimentos.

A análise e a atribuição de pesos aos critérios não são tarefas simples, pois requerem a clara compreensão e percepção da função de cada um deles, para que possa ser julgada sua relevância ao modelo de simulação. É importante lembrar, por exemplo, que ao serem definidos os critérios essenciais (indicados pelo peso 4), estarão sendo desclassificados automaticamente todos os *softwares* que não os atenderem.

3.2.1.2. Identificação dos *softwares* de simulação e suas características

Nesta etapa, são identificados os *softwares* de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado e suas principais características. Publicações como o *Simulation Software Survey* (ORMS TODAY, 2003) e o *Buyer's Guide Simulation* (ELLIOTT, 2000) podem auxiliar nesta coleta de informações, pois apresentam resumidamente as principais características de diversos *softwares* de simulação. Outros dados estão disponibilizados na Internet, nos *sites* dos fornecedores, tais como manuais comerciais e técnicos, descritivos das características, vantagens de utilização, exemplos de aplicação etc.

Outras fontes complementares são os artigos de pesquisa e as renomadas conferências de simulação, como a *Winter Simulation Conference* (WSC, 2005), a *Summer Simulation Multiconference* (SUMMERSIM, 2005), a *Spring Simulation Multiconference* (SPRINGSIM, 2005) e a *Western Simulation Multiconference* (WESTERNSIM, 2005); o contato com empresas especializadas em consultoria na área de simulação também pode ser importante para o levantamento de informações.

Assim, após a escolha dos *softwares* candidatos, deve ser realizada uma cuidadosa investigação de suas características. A solicitação de uma versão para demonstração é muito importante, pois permite o contato inicial e a exploração prática do *software*; a visualização de modelos construídos para demonstração, disponibilizados pelos fornecedores, possibilita identificar os recursos que foram utilizados em seu desenvolvimento; o envio de

questionários, indagando sobre características e dúvidas relacionadas ao *software* de simulação, é outro importante meio para coleta de dados. Dessa forma, pode-se enriquecer as informações obtidas através dos *sites* dos fornecedores, artigos publicados por pesquisadores, materiais disponibilizados em conferências, entrevistas com especialistas em simulação e buscas na Literatura.

Ao término desta etapa, será atribuída uma pontuação para cada um dos critérios propostos (para cada um dos *softwares*), relacionados às características gerais, à entrada de dados, ao desenvolvimento do modelo, à saída de dados, à eficiência e teste, à execução e ao suporte técnico oferecido pelo fornecedor. Dessa forma, um critério atendido receberá o valor 1 como pontuação; em caso contrário, será atribuído o valor 0.

Cabe destacar que, nesta etapa, não é interessante guiar a identificação e a avaliação dos *softwares* de simulação candidatos por meio de normas, como a NBR ISO/IEC 12119 (1998), pois o objetivo é levantar rapidamente suas características para confrontá-las com os critérios propostos. A verificação da conformidade com as normas regulamentadoras complementa este trabalho e pode ser realizada para o *software* selecionado, ao término da aplicação deste método.

3.2.1.3. Classificação dos *softwares*

A classificação dos *softwares* de simulação de eventos discretos candidatos será feita com base na matriz de dados construída nas etapas anteriores, composta pelos critérios, seus pesos e pela pontuação recebida. Serão desclassificados os *softwares* que não atenderem a todos os critérios essenciais, ou seja, aqueles cujo peso 4 foi atribuído. Os demais serão classificados, segundo os pontos obtidos, em ordem decrescente. Para tanto, sua pontuação total (PT) será calculada pela somatória do produto entre o peso (P) e a pontuação (S), para cada critério (i) avaliado (equação 1).

$$PT = \sum_i P_i \times S_i \quad (\forall i) \quad (1)$$

De acordo com o número de candidatos, o número de *softwares* que passarão para a fase seguinte poderá variar; entretanto, estes serão limitados em no máximo 10, restringindo o domínio de solução, mas mantendo ainda um conjunto representativo do grupo original. É importante ressaltar que nem sempre o *software* com a melhor classificação será necessariamente selecionado, pois somente na próxima fase será avaliada sua qualidade. A classificação resultante dessa fase se presta unicamente à escolha dos melhores *softwares* de simulação para posterior elaboração de estudos mais detalhados.

3.2.2. Segunda fase: avaliação da qualidade dos *softwares*

Nesta fase será analisada a qualidade dos *softwares* de simulação de eventos discretos, procurando identificar qual deles atende plenamente aos critérios essenciais. Assim, eles serão avaliados cuidadosamente, comparando seu desempenho por intermédio do desenvolvimento de aplicações práticas e experimentos em casos típicos encontrados em sistemas logísticos.

A seleção seguirá as premissas do método de análise hierárquica (AHP). Este foi escolhido devido ao tratamento da inconsistência existente no julgamento humano. Diversos trabalhos revisados utilizaram o método de atribuição de pesos e pontuação nesta fase, entretanto, pode-se observar que este não permitia a identificação e a correção das inconsistências geradas durante a comparação dos critérios escolhidos para avaliação da qualidade dos *softwares*.

Por fim, será realizada a análise de sensibilidade em relação às modificações nos critérios essenciais utilizados para avaliação comparativa, à importância de cada um deles e aos julgamentos realizados, buscando avaliar a robustez do resultado obtido.

Os seguintes passos compõem a fase proposta para a avaliação da qualidade dos *softwares* de simulação de eventos discretos:

1. Desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e experimentos;
2. Aplicação do método de análise hierárquica (AHP);
3. Análise de sensibilidade.

3.2.2.1. Desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e experimentos

Para a avaliação da qualidade dos *softwares* de simulação, devem ser selecionados os critérios mais importantes do conjunto proposto na seção 3.1, ou seja, os critérios essenciais (aqueles cujo peso 4 foi atribuído na seção 3.2.1.1), visto que estes foram previamente identificados como indispensáveis para o sucesso do modelo de simulação.

A seguir, devem ser desenvolvidas aplicações práticas e experimentos para casos típicos encontrados em sistemas logísticos, utilizando-se os *softwares* de simulação classificados na primeira fase; esses modelos de simulação devem permitir a avaliação comparativa do desempenho dos *softwares* candidatos em relação aos critérios essenciais. O próximo capítulo descreve detalhadamente a proposta de dois problemas testes para avaliação e seleção de *softwares* de simulação aplicados à análise de sistemas logísticos; o primeiro abordará o dimensionamento da tancagem de um porto e, o segundo, tratará do dimensionamento de uma frota de caminhões.

É importante que os modelos construídos utilizem o mesmo conjunto de dados de entrada e distribuições de probabilidades, pois dessa forma será possível comparar os resultados obtidos e as medidas de desempenho estabelecidas nos problemas testes descritos no capítulo 4. Nesta etapa, também devem ser avaliadas as características dos *softwares* utilizadas para o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos, as facilidades oferecidas para o tratamento dos dados de entrada, a qualidade dos relatórios de saída e os

assistentes para depuração de erros; além disso, as características gerais, os custos envolvidos e a questão do suporte técnico também devem ser analisadas.

Os fornecedores, inclusive, podem ser envolvidos nesta etapa, auxiliando no desenvolvimento de modelos de simulação mais eficazes e eficientes. Adicionalmente, pode ser interessante procurar, na Literatura especializada, estudos que descrevam aplicações utilizando os *softwares* candidatos, identificando seus pontos fortes e fracos.

3.2.2.2. Aplicação do método de análise hierárquica (AHP)

O método de análise hierárquica permite a identificação e a correção da inconsistência gerada pelo julgamento humano, principalmente para critérios qualitativos (SAATY, 1980 e MORITA, 1998). Para tanto, um problema complexo deve ser representado a partir de sua estrutura hierárquica com o objetivo de priorizar os critérios na análise das diversas alternativas. Assim, nessa etapa serão considerados os critérios essenciais (aqueles cujo peso 4 foi atribuído na seção 3.2.1.1), para avaliação comparativa do desempenho dos *softwares*. A figura 5 apresenta a estrutura do problema de seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos, supondo os critérios essenciais C_1 , C_2 e C_3 (composto pelos sub-critérios $C_{3.1}$, $C_{3.2}$ e $C_{3.3}$), e a avaliação dos *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 .

A seguir, os critérios essenciais são comparados par-a-par, expressando sua importância relativa, utilizando para tanto, a **escala de julgamentos** apresentada na tabela 31. A partir destes, forma-se então a **matriz de comparação paritária**, cujos elementos são as intensidades de importância atribuídas à comparação entre dois critérios ou sub-critérios essenciais. É importante destacar que esta é uma matriz recíproca, ou seja, o julgamento J_{km} corresponde a um $J_{mk} = 1/J_{km}$ e todo $J_{kk} = J_{mm} = 1$ (onde k representa a linha e m a coluna); além disso, todos os valores devem ser positivos.

Figura 5. Estrutura hierárquica do problema de seleção de softwares de simulação.

Tabela 31. Escala de julgamentos para comparação paritária.

Intensidade de importância	Definição
1	Critérios essenciais com mesma importância
3	Fraca importância de um critério essencial sobre o outro
5	Importância forte de um critério essencial sobre o outro
7	Importância muito forte de um critério essencial sobre o outro
9	Importância extrema de um critério essencial sobre o outro
2, 4, 6, 8	Intensidades intermediárias entre valores adjacentes
Recíprocos dos valores acima de zero	Por exemplo, se o critério essencial C_1 recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com o critério essencial C_2 , então C_2 tem o valor recíproco quando comparado com C_1

Fonte: Adaptado de Saaty, 1980.

O número de julgamentos (NJ) necessários para a construção da matriz é dado pela equação 2, onde n indica a ordem da matriz. A tabela 32, a seguir, apresenta a matriz de comparação paritária, supondo os critérios essenciais C_1 , C_2 e C_3 .

$$NJ = n \times (n-1) / 2 \quad (2)$$

Tabela 32. Matriz de comparação paritária.

	C₁	C₂	C₃
C₁	1	J ₁₂	J ₁₃
C₂	¹ /J ₁₂	1	J ₂₃
C₃	¹ /J ₁₃	¹ /J ₂₃	1

O próximo passo consiste no cálculo do **vetor de prioridades relativas**, que indica a importância relativa de cada critério essencial. Para tanto, as colunas da matriz são normalizadas, dividindo-se cada elemento pela somatória dos valores de sua coluna (equação 3), obtendo-se *JN* (julgamento normalizado); a seguir, calcula-se a média dos valores normalizados para cada linha, encontrando-se os valores do vetor de prioridades relativas – *VPR_k* (equação 4).

$$JN_{km} = J_{km} / \sum_k J_{km} \quad (\forall k, m) \quad (3)$$

$$VPR_k = \sum_m JN_{km} / n \quad (\forall k, m) \quad (4)$$

É importante verificar a consistência dos julgamentos realizados para os pares de critérios essenciais. Assim, deve-se multiplicar a matriz de comparação paritária pelo vetor de prioridades relativas, obtendo-se o **vetor de pesos** – *VPE_k* (equação 5).

$$\begin{bmatrix} J_{11} & \dots & J_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{k1} & \dots & J_{km} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} VPR_1 \\ \vdots \\ VPR_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VPE_1 \\ \vdots \\ VPE_k \end{bmatrix} \quad (5)$$

A seguir, deve-se dividir o primeiro elemento do vetor de pesos (*VPE₁*) pelo primeiro componente do vetor de prioridades relativas (*VPR₁*); o segundo elemento do vetor de pesos

(VPE_2) pelo segundo componente do vetor de prioridades relativas (VPR_2) e, assim por diante, até o último elemento, obtendo-se o **vetor de consistência** – VC_k (equação 6).

$$VC_k = VPE_k / VPR_k \quad (\forall k) \quad (6)$$

A média dos valores do vetor de consistência representa o **maior autovalor** ou $\lambda_{máx}$ (equação 7). Quanto mais próximo $\lambda_{máx}$ for de n , mais consistente foram os julgamentos realizados para os critérios essenciais. O **índice de consistência** (IC) pode ser calculado através da equação 8; por fim, a **razão de consistência** (RC) é obtida pela equação 9.

$$\lambda_{máx} = \sum_k VC_k / n \quad (\forall k) \quad (7)$$

$$IC = (\lambda_{máx} - n) / (n - 1) \quad (8)$$

$$RC = IC / IR \quad (9)$$

O **índice randômico** (IR) assume diferentes valores de acordo com n ; a tabela 33 apresenta os valores descritos em Saaty (1980), para n entre 1 e 15.

Tabela 33. Valores para o índice randômico (IR).

n	IR	n	IR	n	IR
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

Fonte: Adaptado de Saaty, 1980.

O resultado obtido para a equação 9 deve ser menor ou igual a 10% ($RC \leq 0,10$), indicando que os julgamentos foram consistentes; em caso contrário, sua qualidade deve ser melhorada por meio da revisão da intensidade de importância atribuída aos pares de critérios essenciais.

A construção da matriz de comparação paritária e os cálculos do vetor de prioridades relativas e da razão de consistência devem ser repetidos: (1) para cada critério ou sub-critério essencial em relação aos *softwares* em avaliação; (2) para os sub-critérios, em relação ao critério essencial em que se está conectado; e (3) para os critérios essenciais, em relação ao objetivo do problema. Assim, supondo o problema apresentado na figura 5, seriam necessárias 7 matrizes de comparação paritária, a saber:

1. Avaliando os *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 em relação ao critério essencial C_1 ;
2. Avaliando os *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 em relação ao critério essencial C_2 ;
3. Avaliando os *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 em relação ao critério essencial $C_{3,1}$;
4. Avaliando os *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 em relação ao critério essencial $C_{3,2}$;
5. Avaliando os *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 em relação ao critério essencial $C_{3,3}$;
6. Avaliando os sub-critérios $C_{3,1}$, $C_{3,2}$ e $C_{3,3}$ em relação ao critério essencial C_3 ;
7. Avaliando os critérios C_1 , C_2 e C_3 em relação ao objetivo do problema.

A seguir, para obter o resultado final, os vetores de um mesmo nível (a partir do nível mais baixo) são combinados em uma **matriz de prioridades**, que é multiplicada pelo vetor do nível acima (em que está conectado), atualizando-se os valores do vetor de prioridades relativas. Esse procedimento deve ser repetido em todos os níveis da hierarquia para a obtenção do vetor de prioridades global, que indicará o *software* de simulação de eventos discretos que apresentou o melhor desempenho na avaliação comparativa da qualidade de

suas características, atendendo plenamente aos critérios essenciais para o desenvolvimento de aplicações voltadas à análise de sistemas logísticos.

Para simplificar a aplicação do AHP, neste trabalho será utilizado o *software* Expert Choice 2000 (EXPERT CHOICE, 2000), desenvolvido pela Expert Choice Inc, de *Pittsburgh*, Estados Unidos da América, visto que o objetivo desta pesquisa é utilizá-lo como parte do método proposto para a avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, aplicados à análise de sistemas logísticos. Esse *software* calcula os vetores de prioridades relativas e a razão de consistência para as matrizes de comparação paritária fornecidas como dados de entrada, além do vetor de prioridades global, que indicará o *software* de simulação de eventos discretos que apresentou o melhor desempenho na avaliação comparativa da qualidade de suas características.

3.2.2.3. Análise de sensibilidade

Após a seleção do *software* de simulação de eventos discretos, indicado pelo vetor de prioridades global, é importante avaliar a sensibilidade do resultado, em relação às variações nos valores dos julgamentos e nos critérios essenciais. O *software* Expert Choice 2000 também será utilizado nessa etapa, pois facilita a construção do gráfico de desempenho dos *softwares* candidatos em relação a cada um dos critérios essenciais; além disso, também possibilita alterar dinamicamente os valores de suas prioridades, permitindo avaliar diferentes cenários. Assim, as seguintes análises de sensibilidade podem ser realizadas:

1. Identificar a faixa de variação no valor da prioridade de cada um dos critérios essenciais que não provoca a alteração no resultado final, avaliando quais destes podem modificar o resultado da seleção e estabelecendo cenários, onde diferentes *softwares* poderiam ser selecionados devido à priorização de determinados critérios essenciais.

2. Atribuir a mesma prioridade para todos os critérios essenciais, avaliando o desempenho de cada um dos *softwares* de simulação em relação a estes critérios;
3. Caso estejam sendo avaliados sub-critérios, estes podem ser desconsiderados. Uma nova matriz de comparação paritária deve ser gerada para os critérios essenciais em relação aos *softwares* de simulação; a seguir, avaliar o resultado deste novo cenário e comparar com o obtido na seção 3.2.2.2.

3.3. Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação aplicados à análise de sistemas logísticos. Este foi proposto devido à extensiva utilização da simulação de eventos discretos para modelagem e análise de diversos problemas nesta área e à escassez de métodos que auxiliem na seleção de um *software* que atenda plenamente às necessidades dos modelos desenvolvidos com o menor custo total associado. Esse é um problema que está se agravando, em função do número crescente de opções que estão disponíveis atualmente no mercado, com diferentes características, vantagens, desvantagens e, principalmente, custos.

Assim, foi proposto um amplo conjunto de critérios para avaliação, dividido em 7 categorias, com o objetivo de contemplar diversas características consideradas importantes para a modelagem e análise de aplicações em sistemas logísticos; essas categorias estão relacionadas às características gerais do *software*, à entrada de dados, ao desenvolvimento do modelo, à saída de dados, à eficiência e teste, à execução e ao suporte técnico oferecido pelo fornecedor. No total, foram descritos 111 critérios; dentre estes, 19 foram incorporados com o objetivo de atender às necessidades específicas para o desenvolvimento de modelos de casos típicos em sistemas logísticos. Assim, a maior parte dos critérios incorporados pertence às

categorias de entrada de dados (4), desenvolvimento do modelo (9) e saída de dados (5); sendo somente um critério adicionado para complementar a avaliação da eficiência e teste.

A organização hierárquica das categorias foi concebida para suportar modificações, dado o aspecto dinâmico da evolução da tecnologia e da constante atualização dos *softwares*. Assim, procurou-se manter a flexibilidade, tanto para a alteração dos critérios atuais, quanto para a incorporação de novos.

O procedimento para a seleção foi estruturado em duas fases, buscando aumentar sua eficiência, especialmente quando se tem um grande número de *softwares* candidatos, visto que este desclassifica na primeira fase aqueles que não satisfazem aos critérios essenciais para as aplicações que serão desenvolvidas. Na segunda fase, é analisada a qualidade dos *softwares*, procurando identificar qual deles atende plenamente aos critérios essenciais – ou seja, aquele cujas características facilitam o desenvolvimento de modelos e a depuração de erros, suporta diferentes formatos e possibilita o tratamento dos dados de entrada, permite a geração de relatórios personalizados etc. – com o menor custo total associado, desde o tempo necessário para a coleta de informações e para a avaliação dos *softwares* candidatos, aos custos ligados a aquisição de licença, *hardware*, manutenção, suporte, entre outros.

Cabe destacar que o procedimento de seleção proposto procurou incorporar as melhores características dos trabalhos identificados na Literatura. A primeira fase gera uma lista com os *softwares* que suportam os critérios essenciais por meio da aplicação do método de atribuição de pesos e pontuação, cuja simplicidade e eficiência foi destacada pelos autores que o utilizaram. Já a segunda fase, utiliza o método de análise hierárquica (AHP), visto que este permite a identificação e a correção das inconsistências geradas durante a comparação da importância dos critérios essenciais e do desempenho dos *softwares* de simulação em relação a cada um destes critérios. Por fim, ainda foram apresentados alguns pontos para o

desenvolvimento da análise de sensibilidade do resultado final, em relação às variações nos valores das prioridades atribuídas e nos critérios essenciais.

4. PROBLEMAS LOGÍSTICOS TÍPICOS

Neste capítulo serão descritos dois problemas logísticos típicos, cujas características permitem sua resolução, utilizando-se os *softwares* de simulação de eventos discretos. O primeiro, tratará do dimensionamento e da avaliação da tancagem de um porto; já o segundo, possibilitará a análise de capacidade e o dimensionamento de uma frota de caminhões que transporta materiais entre uma fábrica e um porto.

No problema do dimensionamento da tancagem, será possível, por meio da simulação, modelar o comportamento aleatório de seus componentes, como navios e caminhões-tanque, e avaliar os efeitos da configuração de diferentes parâmetros nas distribuições de probabilidades dos padrões de chegada e atendimento. Além disso, será possível prever e analisar a operação do porto, obtendo-se os subsídios necessários para o dimensionamento da capacidade do tanque e a avaliação dos impactos dessa decisão no comportamento global do sistema.

Já no dimensionamento da frota de caminhões, que circulam entre uma fábrica e um porto, além da modelagem do comportamento aleatório de seus componentes, a simulação de eventos discretos permitirá a análise das capacidades individuais do sistema e a identificação de possíveis gargalos. Assim, será possível propor cenários que possibilitem investigar quais mudanças trariam ganho ao volume transportado, aumentando a capacidade do sistema e balanceando a utilização dos recursos.

Esses problemas logísticos típicos serão retomados no próximo capítulo, que abordará a aplicação prática do método proposto para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, durante a fase de desenvolvimento e condução de experimentos com os modelos de simulação.

4.1. Dimensionamento da tancagem de um porto

Nesta aplicação logística típica, a simulação de eventos discretos pode ser utilizada para a avaliação e análise de um fluxo contínuo de materiais. O problema é caracterizado pela chegada dos navios em um porto, sua atracação e os procedimentos necessários para carregamento de um tanque, cuja carga é aliviada por caminhões-tanque (figura 6). Os principais objetivos consistem no dimensionamento da capacidade desse tanque, para garantir a continuidade da operação, e na avaliação das consequências dessa decisão no tempo médio (fila) que os navios e caminhões-tanque aguardam para iniciar as operações de carregamento e descarregamento, respectivamente.

Figura 6. Caracterização do problema de dimensionamento da tancagem.

Segundo Bowersox e Closs (1996), o maior benefício da simulação de estoques, abordada neste problema, é a possibilidade de modelar as diversas características e restrições de um problema real sem a necessidade de adotar pressupostos simplificadores; a utilização dos métodos analíticos, embora permita determinar a solução ótima do problema, pode demandar a adoção de hipóteses que o descaracterizam. Dessa forma, é possível avaliar o volume médio do tanque em relação aos padrões de chegada e atendimento (seja na operação de carregamento efetuada pelos navios, seja no descarregamento realizado pelos caminhões-tanque); dados de sistemas reais podem ser coletados, analisados, validados e utilizados para a

parametrização do modelo de simulação. Diferentes cenários também poderão ser desenvolvidos, para investigar a influência do volume máximo do tanque no tempo médio (fila) que os navios e caminhões-tanque aguardam para iniciar as operações.

A modelagem desse problema por meio de um método analítico seria mais complexa e dificilmente permitiria capturar todas as características de uma operação real. Law e Kelton (2000) sugerem que sistemas complexos, com elementos aleatórios que não são descritos perfeitamente por modelos matemáticos, resolvidos analiticamente, devem ser estudados utilizando-se a simulação de eventos discretos.

Assim, a partir desse problema básico, diversos modelos de simulação podem ser derivados e empregados na resolução de problemas atuais, como a avaliação e análise dos impactos causados pelos investimentos, particularmente em tancagem, que estão ocorrendo no sistema portuário brasileiro. Segundo dados da Universia Brasil (2003), a União Terminais, empresa de armazenamento e movimentação de graneis líquidos, planejava investir, em 2003, R\$ 20,8 milhões e ampliar sua capacidade de tancagem nos portos de Santos, no Estado de São Paulo (para atender ao crescimento das exportações de álcool e das importações de derivados básicos de petróleo), e de Paranaguá, no Estado do Paraná (buscando atender ao óleo de soja destinado à exportação).

Já a pareceria formada no início de 2005 pelas empresas Crystalsev, Cosan e Nova América, para a exportação de álcool combustível também pelo porto de Santos (utilizando seu terminal intermodal), investirá R\$ 11,5 milhões em instalações com capacidade estática de tancagem de 40 mil metros cúbicos; a planta do terminal prevê, ainda, a ampliação futura da capacidade para 80 mil metros cúbicos (CODESP, 2005).

A Superintendência da Administração dos portos de Paranaguá e Antonina, ambos no Estado do Paraná, informou que, a partir de 2005, seriam investidos R\$ 1,3 milhões na instalação de terminais para movimentação de mercadorias do segmento de carga geral e

granéis líquidos (principalmente o álcool industrial), com capacidade para 35 mil metros cúbicos (MARTINI MEAT, 2005).

Dessa forma, devido aos recentes investimentos no sistema portuário nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, particularmente para o aumento da capacidade de armazenamento e movimentação de granéis líquidos, como álcool combustível, derivados de petróleo, óleo de soja, produtos químicos, entre outros, pode-se notar a importância do problema de dimensionamento da tancagem e da investigação e análise dos impactos causados no sistema, tais como: nas filas dos navios, nas filas de caminhões-tanque e na infra-estrutura portuária necessária para acomodar essas mudanças.

4.1.1. Descrição do problema teste

Para a construção do modelo de simulação do problema de dimensionamento da tancagem, adotar-se-á que os navios, com capacidade para 40.000 toneladas, chegam a cada 3,0 dias, em média (segundo a distribuição exponencial); o tempo de descarregamento será regido por uma distribuição normal com média de 2,0 dias e desvio padrão de 0,5 dia. Somente um berço para atracação estará disponível no porto.

No local onde ocorre o carregamento dos caminhões-tanque (descarregamento do tanque), estarão disponíveis 10 baias; serão despendidos, com essa operação, 20,0 minutos por caminhão (constante). Os caminhões-tanque, com capacidade para 25 toneladas, chegarão regidos pela distribuição exponencial. É importante garantir o equilíbrio do tanque, ou seja, como este é carregado com 40.000 toneladas a cada 3,0 dias (em média), serão necessários 1.600 caminhões-tanque para aliviá-lo nesse mesmo intervalo de tempo. A figura 7 sumariza os dados do problema teste que será modelado, utilizando-se os *softwares* de simulação de eventos discretos.

Figura 7. Dados do problema teste.

A formulação conceitual é uma importante etapa, na qual se desenvolve um modelo preliminar, geralmente gráfico, para definir os componentes, as variáveis e a lógica que constitui o sistema. A figura 8 apresenta o modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da tancagem.

Para tanto, as seguintes variáveis também deverão ser criadas:

- **carga_navio:** identifica a carga transportada pelo navio, em toneladas;
- **volume_tanque:** identifica o volume atual do tanque, em toneladas;
- **volume_max_tanque:** identifica a capacidade total do tanque, em toneladas;
- **volume_caminhao_tanque:** identifica a capacidade total dos caminhões-tanque, em toneladas.

Figura 8. Modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da tancagem.

É importante também criar uma estrutura auxiliar que permita registrar o volume do tanque, em períodos fixos de tempo, como, por exemplo, a cada 1 minuto, para posterior análise desses dados para o dimensionamento da capacidade do tanque. A figura 9 apresenta o modelo conceitual desse sub-modelo.

Figura 9. Modelo conceitual do sub-modelo para registrar o volume do tanque.

Os parâmetros relacionados à execução do modelo também deverão ser ajustados:

- **Horizonte:** serão simulados 30,0 dias (720 horas) de operação do porto;
- **Replicações:** serão realizadas 999 replicações.

Finalmente, as seguintes medidas de desempenho serão coletadas para o desenvolvimento dos cenários e a análise dos resultados obtidos com o modelo de simulação:

- Volume médio do tanque (toneladas);
- Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (horas);
- Número médio e máximo de navios aguardando para carregar o tanque;
- Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (horas);
- Número médio e máximo de caminhões aguardando para descarregar o tanque;
- Taxa média de ocupação do berço;
- Taxa média de ocupação das baias.

4.2. Dimensionamento da frota

Este problema logístico típico caracteriza-se por uma frota homogênea de caminhões que circula entre uma fábrica e um porto transportando materiais; os caminhões, obrigatoriamente, passam pela pesagem na fábrica antes do carregamento, e, no porto, também anteriormente ao descarregamento (figura 10). Os principais objetivos são o dimensionamento do tamanho da frota, analisando-se o total transportado em um período de tempo pré-determinado, e a avaliação do tempo médio (fila) que os caminhões aguardam para serem atendidos em cada um dos componentes do sistema.

Figura 10. Caracterização do problema de dimensionamento da frota.

A simulação de eventos discretos tem sido extensivamente utilizada para investigar o comportamento e avaliar o desempenho de novos sistemas (LAW e KELTON, 2000; FREITAS, 2001). Entretanto, embora não permita determinar o número ótimo para composição da frota de caminhões (geralmente calculado pelos métodos analíticos), a simulação de eventos discretos possibilita encontrar uma boa solução e identificar as medidas de desempenho para a análise de capacidade de cada um dos componentes do sistema, possibilitando analisar gargalos operacionais e recursos ociosos. Os dados para configuração dos padrões de atendimento podem ser coletados em operações reais; assim, diferentes frotas de caminhões poderão ser experimentadas, avaliando-se o volume total transportado e a ocupação média dos componentes, para identificar os gargalos que estejam limitando o desempenho global do sistema.

O dimensionamento da frota e o balanceamento de capacidade encontram aplicabilidade em problemas reais, como os transtornos causados pela fila de caminhões que aguardavam para embarcar a safra de açúcar de 2004 no porto de Santos, no Estado de São Paulo, agravada ainda pelo escoamento concorrente da safra de soja. Segundo os administradores do porto, estas foram consequências da falta de capacidade viária e serão solucionadas somente após a construção de avenidas perimetrais que aumentem a acessibilidade ao porto (TRIBUNA DE SANTOS, 2004).

O porto de Paranaguá, no Estado do Paraná, também enfrentou problemas em 2004, com filas de até 70 quilômetros de carretas carregadas com milho e soja. Segundo a Superintendência da Administração dos portos de Paranaguá e Antonina, ambos no Estado do Paraná, as filas foram decorrentes de um problema crônico e antigo do porto: a capacidade de descarga nos terminais e a de embarque nos navios é inferior ao volume transportado pelos caminhões. Os nove terminais do Corredor de Exportação de Grãos tinham estrutura para descarregar 1.800 caminhões por dia; entretanto, o porto chegou a receber 2.800 carretas diárias (GAZETA DO POVO, 2004).

Em 2005, seria criado, ainda segundo a administração desse porto, um retroporto a 200 quilômetros dos terminais de embarque, para diminuir a fila de caminhões de soja no período da exportação; também seriam investidos R\$ 90 milhões para ampliação do cais e modernização da infra-estrutura portuária (FOLHA DE SÃO PAULO, 2005).

Pode-se observar, a partir destes casos, que a simulação de eventos discretos pode ser empregada na análise de diversos problemas logísticos atuais, ajudando a dimensionar a frota de caminhões e a analisar as filas nos componentes do sistema, identificando-se os gargalos e possibilitando a avaliação de cenários que permitam balancear a capacidade dos recursos e possam contribuir para a melhoria na eficiência dos processos.

4.2.1. Descrição do problema teste

Para a construção de um modelo de simulação para o problema de dimensionamento da frota (figura 11), adotar-se-á que o sistema possui somente duas balanças: uma está localizada na fábrica e, a outra, no porto; em cada balança, serão gastos 10,0 minutos, com desvio padrão de 3,0 minutos, para pesagem dos caminhões (seguindo a distribuição normal). Na fábrica, ainda estarão disponíveis 5 postos de carga; o tempo de carregamento será regido

por uma distribuição triangular, com média de 120,0 minutos (60,0 minutos, no mínimo, e 180,0 minutos, no máximo).

Os caminhões, com capacidade para transportar 25 toneladas, levarão 240,0 minutos (constante) para se deslocar no trecho entre a fábrica e o porto, independentemente do sentido. No porto, estarão disponíveis 7 postos de descarga; a operação de descarregamento será regida por uma distribuição triangular, com valor médio de 300,0 minutos (mínimo de 240,0 e máximo de 360,0 minutos).

Figura 11. Dados do problema teste.

A figura 12 apresenta o modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da frota de caminhões.

Figura 12. Modelo conceitual do problema teste de dimensionamento da frota.

As seguintes variáveis deverão ser criadas:

- **frota:** identifica o número de caminhões que circularão entre a fábrica e o porto;
- **carga:** identifica a carga total transportada pelos caminhões, em toneladas;
- **total_transportado:** indica a carga total transportada pelos caminhões durante o horizonte de tempo simulado, em toneladas.

Os parâmetros relacionados à execução do modelo também deverão ser ajustados:

- **Horizonte:** serão simulados 30,0 dias (720 horas) de operação do porto;
- **Replicações:** serão realizadas 999 replicações.

Por fim, as seguintes medidas de desempenho serão avaliadas durante a realização dos experimentos com o modelo de simulação para o problema de dimensionamento da frota de caminhões:

- Carga total transportada pela frota no período (toneladas);
- Número de caminhões que compõem a frota;
- Tempo médio de espera na balança da fábrica (minutos);
- Número médio e máximo de caminhões aguardando a balança da fábrica;
- Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (minutos);
- Número médio e máximo de caminhões aguardando o carregamento na fábrica;
- Tempo médio de espera na balança do porto (minutos);
- Número médio e máximo de caminhões aguardando a balança do porto;
- Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (minutos);
- Número médio e máximo de caminhões aguardando o descarregamento no porto;
- Taxa média de ocupação da balança na fábrica;
- Taxa média de ocupação da balança no porto;
- Taxa média de ocupação do posto de carga da fábrica;
- Taxa média de ocupação do posto de descarga do porto.

4.3. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram contextualizados dois problemas tipicamente encontrados em sistemas logísticos. O primeiro tratou da questão do dimensionamento da tancagem de um porto; o outro, tinha enfoque no dimensionamento de uma frota de caminhões. Devido às suas características, como a natureza dinâmica do problema e o comportamento aleatório dos elementos, além dos objetivos esperados (tais como o dimensionamento de componentes, a análise da operação, a investigação de gargalos, a avaliação de impactos no sistema decorrentes da experimentação de mudanças e a verificação de medidas de desempenho), é recomendada a utilização da simulação de eventos discretos para o estudo e a resolução destes problemas, dado que os métodos analíticos não possibilitam a modelagem de todas as características de problemas como estes, sem a adoção de hipóteses simplificadoras.

Problemas semelhantes aos apresentados são comuns no sistema portuário brasileiro, seja durante a avaliação dos impactos causados pelos investimentos realizados para o aumento de capacidade, seja devido às filas de caminhões que aguardam para carregar ou descarregar produtos, consequência da deficiência e da precariedade na infra-estrutura oferecida pelos portos nacionais.

Assim, dada a importância e aplicabilidade desses problemas em situações reais, além da representação de casos logísticos típicos, estes foram escolhidos para o desenvolvimento e condução de experimentos com os modelos de simulação, durante a aplicação prática do método proposto para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, que será descrita no próximo capítulo.

5. APLICAÇÃO PRÁTICA DO MÉTODO PROPOSTO

Neste capítulo será descrita a aplicação prática do método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados à análise de sistemas logísticos. Os problemas testes de dimensionamento da tancagem de um porto e de dimensionamento da frota de caminhões apresentados no capítulo anterior também serão retomados nesta seção.

Três *softwares* de simulação de eventos discretos extensivamente utilizados para ensino e pesquisa na **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, identificados como SS₁, SS₂ e SS₃, serão avaliados, a saber:

- **SS₁ – Arena (versão 8.01):** Fornecido pela Rockwell Software Corporation, este *software* de simulação de eventos discretos suporta recursos para modelagem de diferentes sistemas, desenvolvimento de animações, análise estatística e de resultados (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2004; FREITAS, 2001). Foi lançado em 1993, baseado na integração do SIMAN (linguagem de simulação baseada na linguagem GPSS) com o CINEMA (*software* que implementa a animação da simulação).
- **SS₂ – ProModel (versão 2002):** Fornecido pela ProModel Corporation, este *software* de simulação de eventos discretos permite modelar diferentes tipos de sistemas, através de uma interface gráfica intuitiva e orientada a objetos, reduzindo assim a necessidade de programação (BAIRD e LEAVY, 1994; HARRELL *et al.*, 1997). Foi introduzido em 1988, inicialmente direcionado para sistemas de manufatura; entretanto, sua flexibilidade permitiu que fosse adotado em diversas outras áreas, mais notadamente nos setores de saúde e serviços.
- **SS₃ – @Risk (versão 4.5.5):** Fornecido pela Palisade Corporation, este *software* de simulação de eventos discretos é um suplemento (*add-in*) para o Microsoft

Excel que permite aos usuários inserir distribuições teóricas e empíricas de probabilidades para representar a incerteza existente em sistemas reais. Foi desenvolvido especialmente para a análise de risco em diversas áreas, como transporte aéreo, serviços financeiros, manufatura, entre outras (AT RISK, 2005).

A próxima seção descreverá a primeira fase do método, onde serão identificados os critérios essenciais e definida a classificação geral dos *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 conforme a pontuação total obtida. A seguir, será apresentada a segunda fase, na qual será avaliada a qualidade desses *softwares*, procurando-se encontrar qual deles atende plenamente aos critérios essenciais; para tanto, será seguido o método de análise hierárquica (AHP), escolhido por tratar as inconsistências existentes no julgamento humano.

5.1. Primeira fase: verificação dos critérios essenciais

Nesta fase, serão apresentados os pesos atribuídos aos critérios propostos para avaliação dos *softwares* de simulação SS_1 , SS_2 e SS_3 , identificando-se os critérios essenciais, ou seja, aqueles indispensáveis para os modelos voltados à análise de sistemas logísticos, segundo o contexto das aplicações que serão desenvolvidas. A seguir, os *softwares* serão avaliados para verificar quais deles atendem aos critérios, com o objetivo de elaborar a classificação geral a partir da pontuação total obtida.

5.1.1. Atribuição de pesos aos critérios

Inicialmente, foi definido o conjunto de pesos que seriam atribuídos aos critérios; estes variavam entre 0 (critério dispensável) e 4 (critério essencial). Procurou-se avaliar a importância dos critérios, segundo as principais características e objetivos dos problemas

típicos em sistemas logísticos, encontrados em operações complexas, cadeias de suprimentos, sistemas de distribuição e transporte, planejamento e controle de estoque e produção, transporte aéreo, transporte rodo-ferroviário, transporte marítimo, entre outras áreas.

Entre os critérios para avaliação das características gerais (tabela 34), somente o tipo de simulação foi considerado essencial, visto que este trabalho se restringe à avaliação dos *softwares* de simulação de eventos discretos. Critérios como o acesso ao código fonte, dispositivos de segurança para limitar a execução do *software* em somente um micro-computador, licenças para execução em redes de computadores e conectividade com a Internet foram considerados dispensáveis, dado que estes não foram julgados necessários para a implementação dos modelos de simulação, segundo o contexto das aplicações que serão desenvolvidas.

Tabela 34. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação das características gerais.

Crítérios para avaliação das características gerais	Peso
Confiabilidade do fornecedor	3
Portabilidade entre plataformas	1
Compatibilidade entre sistemas operacionais	1
Código fonte aberto	0
Tipo de simulação	4
Dispositivo de segurança	0
Versão para execução em redes	0
Conectividade com a Internet	0
Custos	
Licença	3
<i>Hardware</i>	3
Instalação do <i>software</i>	3
Treinamento	3
Manutenção e suporte técnico	3

A importação de dados a partir de arquivos texto e arquivos CSV foi definida como essencial, entre os critérios para avaliação da entrada de dados, pois as aplicações em sistemas logísticos geralmente lidam com um grande volume de informações. Já a coleta de dados

automática, a partir de sistemas externos e a interface com outros *softwares* de simulação, receberam o peso zero, pois não serão utilizados. A tabela 35, a seguir, apresenta os pesos atribuídos aos critérios para avaliação da entrada de dados.

Tabela 35. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da entrada de dados.

Crítérios para avaliação da entrada de dados	Peso
Importação de dados	
Arquivos texto	4
Arquivos CSV	4
Bancos de dados	3
Planilhas eletrônicas	3
Arquivos XML	2
Geração de estatísticas dos dados	3
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades	3
Coleta de dados automática a partir de sistemas externos	0
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação	0
Modo de entrada de dados	
<i>Batch</i> (em lotes)	3
Interativo	3
Verificação da consistência dos dados	3

Diversos critérios ligados ao desenvolvimento dos modelos foram considerados essenciais para a construção das aplicações em sistemas logísticos (tabela 36). Entre eles, o suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades, utilizadas para a configuração do padrão de chegada das entidades e do seu atendimento pelos recursos disponíveis no sistema; a interface gráfica para o desenvolvimento dos modelos de simulação, evitando-se a necessidade de codificação em uma linguagem de programação; a existência de assistentes para codificação, utilizados para configurar expressões matemáticas, funções internas, acessar as estatísticas geradas, entre outros parâmetros que suportam os modelos com comportamento semelhante aos sistemas logísticos reais; a configuração de variáveis globais, extensivamente utilizadas para auxiliar a modelagem de diversas aplicações em sistemas logísticos, como tanques, carga total transportada, entre outras.

Tabela 36. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação do desenvolvimento do modelo.

Crítérios para avaliação do desenvolvimento do modelo	Peso
Suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades	4
Gerador de números aleatórios	3
Integração do modelo com a animação	2
Ícones	
Biblioteca padrão e definida pelo usuário	2
Qualidade	1
Editor de ícones	2
Importação a partir de outros <i>softwares</i>	1
Gráfico de fundo (<i>background</i>)	
Importação de imagens	2
Editor de <i>layout</i> de tela	2
Construção dos modelos	
Interface gráfica	4
Incorporação ou junção de modelos	2
Codificação	
Assistentes para codificação	4
Programação utilizando a linguagem do fornecedor	3
Sintaxe da linguagem do fornecedor	3
Gerador de código fonte	0
Interface com outras linguagens	1
Biblioteca com funções internas (<i>built in</i>) e definidas pelo usuário	2
Variáveis globais	4
Atributos das entidades	3
Opção para desenvolvimento modularizado	2
Biblioteca com módulos reutilizáveis	2
Objetos típicos para o desenvolvimento de modelos em sistemas logísticos	
Manuseio de materiais	3
Agrupamento e separação de entidades	3
Busca e remoção de entidades em fila	3
Agendamento (<i>schedule</i>)	
Recursos e chegada das entidades	3
Falhas nos recursos (<i>downtimes</i>)	3
Configuração de custos	2
Roteamento condicional	4
Diferentes políticas de fila	3
Animação	
Configuração para habilitar/desabilitar	4
Concorrente à simulação	2
Pós-simulação	0
Controle de velocidade	4
Suporte às diversas unidades de tempo e espaço	4
Visualização da data/hora	4
Visualização dos valores instantâneos de variáveis e gráficos	4
Animação 3D	0

O roteamento condicional também foi julgado essencial por permitir a configuração de diversas regras, como o encaminhamento das entidades somente quando existir um recurso e capacidade disponível em um tanque para atendê-las. Além disso, foi considerada imprescindível a possibilidade de habilitar ou desabilitar a animação do modelo de simulação para reduzir o tempo de execução, quando forem necessárias múltiplas replicações; assim como o controle da velocidade da animação, para acompanhar sua execução passo-a-passo; e o suporte à configuração de diversas unidades de tempo e espaço, para evitar a necessidade de conversão dos dados disponíveis para a parametrização do modelo. Por fim, a visualização da data e da hora, das variáveis e dos gráficos durante a execução do modelo, também foi julgada essencial para avaliar e validar os resultados obtidos. Outros critérios, como a geração do código fonte, a animação pós-simulação e tridimensional foram dispensados do desenvolvimento de modelos voltados à análise de sistemas logísticos, pois não serão contemplados no contexto das aplicações a serem estudadas.

Já a geração de relatórios padrão, com estatísticas ligadas aos objetos utilizados no modelo de simulação, a exportação dos dados gerados durante a execução para arquivos texto e arquivos CSV (periodicamente ou ao término da execução do modelo) e a manutenção de um banco de dados com as estatísticas e valores das variáveis coletadas durante as replicações, foram considerados essenciais, entre os critérios para avaliação da saída de dados (tabela 37), por possibilitar a recuperação e a manipulação dos dados gerados, permitindo a validação dos resultados e das estatísticas não calculadas automaticamente pelo *software*, aumentando a flexibilidade do modelo e enriquecendo as análises que podem ser desenvolvidas para as aplicações em sistemas logísticos. A integração com *softwares* estatísticos e a interface com outros *softwares* de simulação foram descartadas, pois não serão objetos de estudo neste trabalho.

Tabela 37. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da saída de dados.

Crítérios para avaliação da saída de dados	Peso
Relatórios	
Padrão	4
Personalizado	3
Exportação para processadores de texto	2
Exportação para arquivos PDF	2
Exportação de dados	
Arquivos texto	4
Arquivos CSV	4
Bancos de dados	3
Planilhas eletrônicas	3
Arquivos XML	3
Periódica	4
Geração de estatísticas dos dados	4
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades	2
Manutenção do banco de dados	4
Integração com <i>softwares</i> estatísticos	0
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação	0
Geração de gráficos estatísticos	3
Impressão	
<i>Layout</i> da tela	1
Relatórios gerados	1
Visualização prévia	1

Entre os critérios para avaliação da eficiência e teste dos *softwares* de simulação de eventos discretos, somente o tempo necessário para a construção dos modelos foi considerado essencial, por indicar a percepção geral dos recursos oferecidos pelo *software* para a criação de modelos voltados às aplicações em sistemas logísticos. A tabela 38, a seguir, apresenta os pesos atribuídos aos critérios para avaliação da eficiência e teste.

Tabela 38. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da eficiência e teste.

Crítérios para avaliação da eficiência e teste	Peso
Depuração de erros	
Rastreamento da execução	3
Inserção de pontos de parada	3
Inspeção dos valores instantâneos das variáveis	3
Execução passo-a-passo	3
Validação do modelo	3
Verificação da lógica	2
Gerador do modelo conceitual	1
Multitarefa	3
Tempo necessário para construção do modelo	4
Limites do modelo	2

O suporte à execução de múltiplas replicações também foi definido como essencial, pois, para que os resultados obtidos tenham alguma aplicação prática, é importante que o modelo de simulação seja executado diversas vezes, alterando-se unicamente a semente dos números aleatórios; assim, podem ser eliminadas as variações decorrentes do comportamento aleatório do modelo, coletando-se os valores médios para as estatísticas. Já a geração de arquivos executáveis, foi desconsiderada entre os critérios para avaliação da execução do modelo (tabela 39), pois esta não será utilizada neste trabalho.

Tabela 39. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação da execução.

Crítérios para avaliação da execução	Peso
Múltiplas replicações	4
Execução em modo <i>batch</i>	2
Capacidade de reinicialização do sistema e das estatísticas	3
Inicialização em estado não vazio	2
Período de aquecimento	3
Interação com o usuário durante a execução	1
Otimização	1
Geração de arquivos executáveis	0

Por fim, a demonstração *on-site* dos *softwares* foi descartada, ou seja, para este critério foi atribuído o peso zero. A tabela 40, a seguir, apresenta os pesos atribuídos aos critérios para avaliação do suporte técnico.

Tabela 40. Pesos atribuídos aos critérios para avaliação do suporte técnico.

Critérios para avaliação do suporte técnico	Peso
Documentação	
Manual do usuário	2
Tutoriais	2
Exemplos por meio de aplicações	3
Mensagens de erro <i>on-line</i>	2
Ajuda <i>on-line</i>	2
Suporte técnico	3
Experiência necessária	3
Facilidade de aprendizagem	3
Treinamentos	3
Versão para avaliação	3
Demonstração <i>on-site</i>	0
Atualizações do <i>software</i>	3

5.1.2. Identificação dos *softwares* de simulação e suas características

Nesta etapa, procurou-se identificar as principais características dos *softwares* de simulação de eventos discretos SS_1 , SS_2 e SS_3 . Para tanto, o *Simulation Software Survey* (ORMS TODAY, 2003) e o *Buyers Guide Simulation* (ELLIOTT, 2000) foram consultados, pois apresentam uma descrição sucinta de cada um destes *softwares*, além dos sistemas operacionais requeridos e os recursos suportados para o desenvolvimento dos modelos de simulação. Informações disponibilizadas na Internet, nos *sites* dos fornecedores dos *softwares* SS_1 (ROCKWELL AUTOMATION, 2006), SS_2 (PROMODEL CORPORATION, 2006) e

SS₃ (PALISADE CORPORATION, 2006), também foram utilizadas para a avaliação dos critérios propostos.

Para a avaliação dos critérios relacionados à entrada de dados, ao desenvolvimento do modelo, à saída de dados, à eficiência e teste, e à execução do modelo, foi instalada a versão para demonstração disponibilizada pelos fornecedores em um micro-computador padrão (Pentium III 700 MHz com 256 MB de memória RAM). Os assistentes de ajuda (*help*) foram extensivamente utilizados, pois, além da descrição das características dos *softwares* de simulação, ofereciam exemplos práticos de como utilizá-los. Por fim, foram consultadas algumas publicações sobre os *softwares* SS₁ (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2004; FREITAS, 2001), SS₂ (BAIRD e LEAVY, 1994; HARRELL *et al.*, 1997) e SS₃ (AT RISK, 2005).

Os *softwares* receberam o valor 1 como pontuação para cada critério atendido; em caso contrário, o valor 0 foi atribuído. A pontuação total obtida por cada um dos *softwares* de simulação, para cada grupo de critérios avaliado, foi calculada conforme a equação 1 apresentada, ou seja, pela somatória dos produtos entre o peso e a pontuação atribuída para cada critério.

5.1.2.1. Características Gerais

Todos os *softwares* avaliados foram desenvolvidos para a plataforma Intel (micro-computador padrão) e baseados no sistema operacional Microsoft Windows. Identificou-se, ainda, que estes *softwares* suportam a simulação de eventos discretos, objetivo maior deste trabalho.

Os *softwares* SS₂ e SS₃ oferecem uma modalidade de licenciamento para utilização em redes de computadores, onde o número de usuários executando simultaneamente o *software* é limitado pela quantidade de licenças adquiridas. Observou-se também um custo elevado para

aquisição das licenças e de treinamento para os *softwares* SS₁ e SS₂; desta forma, atribuiu-se 0 à pontuação referente a estes critérios para que os mesmos não contribuam com a pontuação total resultante. Em relação aos custos de *hardware* e instalação, todos os *softwares* avaliados foram instalados em um micro-computador padrão (Pentium III 700 MHz com 256 MB de memória RAM); dessa forma, foi atribuído o valor 1, visto que não foi necessário despender recursos financeiros com novo *hardware* ou suporte técnico durante a instalação.

Os fornecedores dos *softwares* avaliados também oferecem gratuitamente diversos documentos técnicos *on-line*, acesso às bases de conhecimento e suporte via *e-mail*. Entretanto, é importante destacar que os aspectos específicos ligados à modelagem e à depuração de erros têm um custo à parte, geralmente tratado como uma consultoria. A tabela 41, a seguir, apresenta as pontuações atribuídas aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios avaliados.

Tabela 41. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação das características gerais.

Crítérios para avaliação das características gerais	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Confiabilidade do fornecedor	3	1	1	1
Portabilidade entre plataformas	1	0	0	0
Compatibilidade entre sistemas operacionais	1	0	0	0
Código fonte aberto	0	0	0	0
Tipo de simulação	4	1	1	1
Dispositivo de segurança	0	0	0	1
Versão para execução em redes	0	0	1	1
Conectividade com a Internet	0	0	0	0
Custos				
Licença	3	0	0	1
<i>Hardware</i>	3	1	1	1
Instalação do <i>software</i>	3	1	1	1
Treinamento	3	0	0	1
Manutenção e suporte técnico	3	1	1	1
TOTAL		16	16	22

5.1.2.2. Entrada de dados

Foi identificado que o *software* SS₁ suporta a importação de dados a partir de arquivos texto, bancos de dados, planilhas eletrônicas e arquivos XML; já o formato CSV, pode ser configurado utilizando-se a opção de arquivo sequencial formatado. O *software* SS₂ também suporta a importação de dados, a partir de arquivos texto e arquivos CSV; a leitura de dados em planilhas eletrônicas está disponível somente para casos particulares, como os tempos de processamento das entidades em cada um dos locais pelos quais estas passam (*entity-location file*) e o agendamento da chegada das entidades (*arrivals file*). Devido ao *software* SS₃ ser um suplemento (*add-in*) para o Microsoft Excel (ou seja, incorpora suas características), este suporta a importação de dados a partir de diversos formatos, como arquivos texto, arquivos CSV, bancos de dados, planilhas eletrônicas e arquivos XML.

O *Input Analyser* disponibilizado pelo *software* SS₁, possibilita o teste de aderência dos dados às diversas distribuições de probabilidades. Já os *softwares* SS₂ e SS₃, permitem tanto o teste de aderência quanto à geração de estatísticas básicas dos dados de entrada.

Por fim, em relação à verificação da consistência dos dados de entrada, foi identificado que o *software* SS₁ apresenta um comportamento anômalo, quando fornecidas letras, em vez de números; já o *software* SS₂, ignora automaticamente qualquer dado não numérico; e, o *software* SS₃, apresenta uma mensagem de erro durante a leitura de dados alfanuméricos. As pontuações atribuídas aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios avaliados para a entrada de dados estão sumarizadas na tabela 42.

Tabela 42. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação da entrada de dados.

Crítérios para avaliação da entrada de dados	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Importação de dados				
Arquivos texto	4	1	1	1
Arquivos CSV	4	1	1	1
Bancos de dados	3	1	0	1
Planilhas eletrônicas	3	1	1	1
Arquivos XML	2	1	0	1
Geração de estatísticas dos dados	3	0	1	1
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades	3	1	1	1
Coleta de dados automática a partir de sistemas externos	0	1	1	0
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação	0	0	0	0
Modo de entrada de dados				
<i>Batch</i> (em lotes)	3	1	1	1
Interativo	3	1	1	0
Verificação da consistência dos dados	3	0	1	1
TOTAL		25	26	28

5.1.2.3. Desenvolvimento do modelo

Foi observado que os *softwares* avaliados suportam a configuração das principais distribuições teóricas de probabilidades, tais como a Normal, Triangular, Exponencial, Lognormal, Erlang, Beta, Poisson, entre outras.

O *software* SS₁ possui uma interface gráfica amigável e intuitiva para a construção dos modelos. Os objetos estão agrupados em categorias (*template panels*) e é possível arrastá-los, copiá-los e colá-los utilizando-se o *mouse*; além de editar suas propriedades. Já o *software* SS₂, utiliza uma abordagem baseada em camadas para o desenvolvimento dos modelos que permite a organização dos objetos e sua rápida visualização. A interface gráfica possibilita selecionar os objetos disponíveis em um menu lateral e configurar suas propriedades por meio de uma tabela. O *software* SS₃ implementa a construção de modelos por intermédio da interface oferecida pelo Microsoft Excel, ou seja, por intermédio de uma planilha eletrônica, não permitindo a configuração da animação do modelo.

Em relação aos assistentes para codificação, os *softwares* avaliados possibilitam a rápida definição de expressões e funções, configuração de distribuições de probabilidades e acesso às estatísticas dos objetos.

Os *softwares* SS_1 e SS_2 também suportam a definição de variáveis globais e atributos, utilizados freqüentemente na modelagem de aplicações em sistemas logísticos para o acesso às estatísticas do modelo, cálculos auxiliares, definições de regras de roteamento das entidades etc.

Diversos objetos oferecidos pelos *softwares* SS_1 e SS_2 facilitam o desenvolvimento de aplicações específicas encontradas em sistemas logísticos, tais como: criação de filas e esteiras; agrupamento e separação de entidades; busca e remoção de entidades em fila; agendamento da chegada de recursos e entidades; programação de falhas em recursos, entre outros. Esses *softwares* também suportam o roteamento condicional, baseado em condições definidas pelo usuário, atributos, distribuições de probabilidades, disponibilidade de recursos, entre outras. Já o *software* SS_3 , não oferece nenhum objeto específico para a construção de modelos em sistemas logísticos.

Por fim, os *softwares* SS_1 e SS_2 permitem a execução do modelo com a animação habilitada ou desabilitada; possibilitam o controle da velocidade da animação e a configuração das diversas unidades de tempo e espaço, além da visualização de gráficos gerados em tempo real e dos valores instantâneos das variáveis definidas no modelo, do tempo de simulação, das estatísticas das entidades, processos, filas e recursos. A tabela 43, a seguir, apresenta as pontuações atribuídas aos *softwares* em cada um dos critérios avaliados para o desenvolvimento dos modelos de simulação.

Tabela 43. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação do desenvolvimento do modelo.

Crítérios para avaliação do desenvolvimento do modelo	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades	4	1	1	1
Gerador de números aleatórios	3	1	1	1
Integração do modelo com a animação	2	1	1	0
Ícones				
Biblioteca padrão e definida pelo usuário	2	1	1	0
Qualidade	1	1	1	0
Editor de ícones	2	1	1	0
Importação a partir de outros <i>softwares</i>	1	1	1	0
Gráfico de fundo (<i>background</i>)				
Importação de imagens	2	1	1	0
Editor de <i>layout</i> de tela	2	1	1	0
Construção dos modelos				
Interface gráfica	4	1	1	1
Incorporação ou junção de modelos	2	1	1	1
Codificação				
Assistentes para codificação	4	1	1	1
Programação utilizando a linguagem do fornecedor	3	1	1	1
Sintaxe da linguagem do fornecedor	3	1	1	1
Gerador de código fonte	0	0	0	0
Interface com outras linguagens	1	1	1	1
Biblioteca com funções internas (<i>built in</i>) e definidas pelo usuário	2	1	1	1
Variáveis globais	4	1	1	0
Atributos das entidades	3	1	1	0
Opção para desenvolvimento modularizado	2	1	1	1
Biblioteca com módulos reutilizáveis	2	1	1	1
Objetos típicos para o desenvolvimento de modelos em sistemas logísticos				
Manuseio de materiais	3	1	1	0
Agrupamento e separação de entidades	3	1	1	0
Busca e remoção de entidades em fila	3	1	1	0
Agendamento (<i>schedule</i>)				
Recursos e chegada das entidades	3	1	1	0
Falhas nos recursos (<i>downtimes</i>)	3	1	1	0
Configuração de custos	2	1	1	1
Roteamento condicional	4	1	1	0
Diferentes políticas de fila	3	1	1	0
Animação				
Configuração para habilitar/desabilitar	4	1	1	0
Concorrente à simulação	2	1	1	0
Pós-simulação	0	0	0	0
Controle de velocidade	4	1	1	0
Suporte às diversas unidades de tempo e espaço	4	1	1	0
Visualização da data/hora	4	1	1	0
Visualização dos valores instantâneos de variáveis e gráficos	4	1	1	0
Animação 3D	0	0	0	0
TOTAL		95	95	32

5.1.2.4. Saída de dados

O relatório padrão gerado pelo *software* SS₁ inclui um conjunto de estatísticas relacionadas às entidades (quantidade gerada, número de entidades que saíram do sistema, entre outras), às filas (tempo médio e máximo em fila, número médio e máximo de entidades em fila etc.), aos recursos (taxa de ocupação média, entre outras) e às variáveis definidas pelo usuário (valores mínimo, médio e máximo). Além disso, quando executada mais de uma replicação, são calculados os valores médios para cada uma dessas estatísticas. Os relatórios podem ainda ser personalizados com a inclusão de estatísticas definidas pelo usuário, embora não seja possível editar seu formato padrão.

Já o relatório padrão do *software* SS₂ apresenta o tempo médio em minutos que cada entidade permaneceu nos objetos modelados (por exemplo, em uma fila); o número médio e máximo de entidades que passaram por esses objetos; o tempo médio em minutos e o percentual de utilização dos recursos; os valores mínimos, médios e máximos assumidos pelas variáveis. Permite também visualizar as estatísticas individuais para cada uma das replicações. Embora os relatórios possam ser personalizados com a inclusão de estatísticas definidas pelo usuário, não é possível editar sua diagramação padrão.

O relatório padrão gerado pelo *software* SS₃ possibilita avaliar diversas estatísticas dos dados simulados, como os valores mínimo, médio, máximo, desvio padrão, variância, entre outras. Além disso, permite visualizar as estatísticas para cada uma das replicações executadas. Os relatórios podem ser personalizados, com a inclusão de variáveis e gráficos definidos pelo usuário, além da formatação de cabeçalhos, rodapés, inclusão de outras informações etc.

Verificou-se também que os *softwares* SS₁ e SS₂ suportam a exportação periódica dos dados, em formatos como arquivos texto e CSV; adicionalmente o *software* SS₁ exporta para planilhas eletrônicas, banco de dados e arquivos XML. Embora o formato CSV não seja

implementado nativamente, esses *softwares* podem formatar os dados antes destes serem exportados. Por fim, o *software* SS₃ pode disponibilizar os dados em todos os formatos avaliados, entretanto, não suporta exportá-los periodicamente.

Todos os *softwares* avaliados geram estatísticas dos dados de saída, como os valores máximo, mínimo e médio, especialmente importantes no caso de múltiplas replicações, mantendo um banco de dados e permitindo sua recuperação e manipulação. Além disso, possibilitam o teste de aderência do desempenho do modelo em relação ao sistema real. As pontuações atribuídas aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios avaliados para a saída de dados estão sumarizadas na tabela 44.

Tabela 44. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação da saída de dados.

Crítérios para avaliação da saída de dados	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Relatórios				
Padrão	4	1	1	1
Personalizado	3	1	1	1
Exportação para processadores de texto	2	1	0	0
Exportação para arquivos PDF	2	1	0	0
Exportação de dados				
Arquivos texto	4	1	1	1
Arquivos CSV	4	1	1	1
Bancos de dados	3	1	0	1
Planilhas eletrônicas	3	1	0	1
Arquivos XML	3	1	0	1
Periódica	4	1	1	0
Geração de estatísticas dos dados	4	1	1	1
Teste de aderência dos dados às distribuições de probabilidades	2	1	1	1
Manutenção do banco de dados	4	1	1	1
Integração com <i>softwares</i> estatísticos	0	0	0	0
Interface com outros <i>softwares</i> de simulação	0	0	0	0
Geração de gráficos estatísticos	3	1	1	1
Impressão				
Layout da tela	1	1	1	0
Relatórios gerados	1	1	1	1
Visualização prévia	1	1	0	1
TOTAL		48	34	39

5.1.2.5. Eficiência e teste

Identificou-se que os *softwares* SS_1 e SS_2 validam o modelo antes de executá-lo, verificando os erros mais comuns, como a desconexão entre os objetos, problemas com a sintaxe, erros na identificação unívoca dos objetos, inconsistências em valores e formatos de parâmetros, funções, variáveis e atributos, entre outros. Entretanto, estes não verificam a lógica do modelo criado, como, por exemplo, recursos não desalocados. Já o *software* SS_3 , não efetua a validação nem a verificação do modelo criado, pois os modelos desenvolvidos utilizam uma interface baseada em uma planilha eletrônica, ou seja, estes critérios não se aplicam.

Em relação ao tempo necessário para a construção dos modelos, o *software* SS_1 oferece uma interface gráfica simples e amigável ao usuário, permitindo a rápida definição e configuração dos modelos de simulação, além de possibilitar arrastar os diversos objetos disponíveis e editar suas propriedades. A utilização de blocos, independentes da animação, facilita a compreensão da lógica implementada e a comparação com o modelo conceitual definido previamente. A organização dos objetos em categorias (processos básicos, avançados, entre outras) também auxilia sua identificação durante o desenvolvimento do modelo de simulação.

Já o *software* SS_2 , utiliza uma abordagem baseada em camadas para a construção dos modelos: inicialmente são definidos os locais (onde as entidades sofrem as operações); a seguir, são criadas as entidades e as redes de caminhos (definem como os objetos modelados se moverão); posteriormente, são configurados os recursos; e, por fim, são definidos os processos (estabelecem a lógica do modelo de simulação) e as chegadas das entidades. Esse desenvolvimento em camadas permite a organização dos objetos e sua rápida visualização durante a construção do modelo de simulação. A interface gráfica é amigável e os objetos disponíveis podem ser selecionados em um menu lateral; suas propriedades são configuradas

por meio de uma tabela, visualizada na parte superior da tela; além disso, a animação é integrada à construção do modelo, reduzindo-se o tempo necessário para seu desenvolvimento.

Por fim, o *software* SS₃ utiliza a interface gráfica do Microsoft Excel, possibilitando a criação de modelos de simulação limitados. Sua utilização é simplificada pelo fato de ser baseada em uma planilha eletrônica difundida e seus objetos serem acessíveis por meio de botões localizados na parte superior da tela ou por meio da biblioteca de funções. A tabela 45, a seguir, apresenta as pontuações atribuídas aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios avaliados.

Tabela 45. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação da eficiência e teste.

Críticos para avaliação da eficiência e teste	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Depuração de erros				
Rastreamento da execução	3	1	1	0
Inserção de pontos de parada	3	1	1	0
Inspeção dos valores instantâneos das variáveis	3	1	1	0
Execução passo-a-passo	3	1	1	0
Validação do modelo	3	1	1	0
Verificação da lógica	2	0	0	0
Gerador do modelo conceitual	1	0	0	0
Multitarefa	3	1	1	0
Tempo necessário para construção do modelo	4	1	1	1
Limites do modelo	2	1	1	1
TOTAL		24	24	6

5.1.2.6. Execução

Foi verificado que o *software* SS₁ permite a configuração de múltiplas replicações, oferecendo ainda a opção de reinicialização das estatísticas coletadas e do estado do sistema após cada replicação. Suporta um elevado número de replicações, pois foi possível, nos testes

realizados, definir até 1.000.000 de replicações (não foi encontrado o valor máximo na documentação disponível); já o *software* SS₂, também pode ser configurado para múltiplas replicações, entretanto, limitadas em 999; possibilita, ainda, estabelecer como será feita a coleta de estatísticas: padrão ou periódica, em intervalos de tempo pré-definidos; por fim, o *software* SS₃ permite configurar até 10.000 replicações.

Em relação à execução em modo *batch*, o *software* SS₁ possui um recurso chamado *Proccess Analyser* no qual são configurados e gerenciados diversos cenários para um mesmo modelo de simulação. Já os *softwares* SS₂ e SS₃, possibilitam a criação de macros, definindo os diferentes cenários, ou seja, os valores que serão assumidos pelas variáveis em cada rodada ou conjunto de replicações para um dado cenário.

Os *softwares* SS₁ e SS₂ permitem ainda a definição do período de aquecimento, ou seja, somente após o sistema entrar em regime (período pré-definido pelo usuário) será iniciada a coleta de estatísticas. As pontuações atribuídas aos *softwares*, em cada um dos critérios avaliados para a execução da simulação, estão sumarizadas na tabela 46.

Tabela 46. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação da execução.

Critérios para avaliação da execução	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Múltiplas replicações	4	1	1	1
Execução em modo <i>batch</i>	2	1	1	1
Capacidade de reinicialização do sistema e das estatísticas	3	1	1	1
Inicialização em estado não vazio	2	0	0	0
Período de aquecimento	3	1	1	0
Interação com o usuário durante a execução	1	0	0	0
Otimização	1	1	1	1
Geração de arquivos executáveis	0	0	0	0
TOTAL		13	13	10

5.1.2.7. Suporte Técnico

Em linhas gerais, todos os fornecedores mantêm atualizadas diversas informações relevantes de seu *software* no *site* na Internet. A documentação acessível através dos menus de ajuda (*help*) também é rica em tutoriais e exemplos através de aplicações simples.

Os fornecedores oferecem opções de treinamentos especializados, divididos em módulos para iniciantes e usuários avançados, além de versões para avaliação, que permitem o contato inicial com os *softwares* e a execução de modelos limitados. Também foi constatada a preocupação com a atualização dos *softwares*, corrigindo-se falhas detectadas e incorporando-se novos recursos. A tabela 47, a seguir, apresenta as pontuações atribuídas aos *softwares* em cada um dos critérios avaliados em relação ao suporte técnico oferecido pelos fornecedores.

Tabela 47. Pontuação atribuída aos *softwares* de simulação em cada um dos critérios para avaliação do suporte técnico.

Crítérios para avaliação do suporte técnico	Peso	SS₁	SS₂	SS₃
Documentação				
Manual do usuário	2	1	1	1
Tutoriais	2	1	1	1
Exemplos por meio de aplicações	3	1	1	1
Mensagens de erro <i>on-line</i>	2	0	0	1
Ajuda <i>on-line</i>	2	1	1	1
Suporte técnico	3	1	1	1
Experiência necessária	3	1	1	1
Facilidade de aprendizagem	3	1	1	1
Treinamentos	3	1	1	1
Versão para avaliação	3	1	1	1
Demonstração <i>on-site</i>	0	0	0	0
Atualizações do <i>software</i>	3	1	1	1
TOTAL		27	27	29

5.1.3. Classificação dos *softwares*

A pontuação total dos *softwares* SS_1 , SS_2 e SS_3 foi calculada pela somatória das pontuações obtidas para cada categoria de critérios; a tabela 48, a seguir, apresenta os resultados consolidados para os *softwares* de simulação de eventos discretos avaliados.

Tabela 48. Pontuação total obtida pelos *softwares* de simulação.

<i>Software</i>	Pontuação Total
SS_1	248
SS_2	235
SS_3	166

Conforme pode ser observado na tabela 49, o *software* SS_3 não atendeu a todos os critérios essenciais, ou seja, aqueles definidos como imprescindíveis para o desenvolvimento dos modelos de simulação voltados à análise de problemas em sistemas logísticos no contexto deste trabalho (estes receberam o peso 4). A maior parte dos critérios não suportados por esse *software* estão relacionados ao desenvolvimento do modelo (variáveis globais, roteamento condicional e animação), principalmente, devido ao *software* SS_3 ser um suplemento (*add-in*) para a planilha eletrônica Microsoft Excel, ou seja, suas características são limitadas, quando comparadas às dos *softwares* SS_1 e SS_2 . Assim, ele foi desclassificado e somente os *softwares* SS_1 e SS_2 passaram para a segunda fase deste método.

A diferença entre o primeiro e o segundo colocado é de apenas 13 pontos, indicando que estes estão próximos em relação ao suporte aos critérios propostos. O *software* SS_1 foi classificado em primeiro lugar; entretanto, esse resultado não garante que ele seja selecionado após a conclusão da segunda fase desse método, pois, somente neste momento será avaliada a qualidade dos recursos oferecidos para o desenvolvimento dos modelos de simulação voltados à análise de sistemas logísticos.

Tabela 49. Pontuação atribuída aos critérios essenciais.

Crítérios essenciais	SS₁	SS₂	SS₃
Tipo de simulação	1	1	1
Importação de dados			
Arquivos texto	1	1	1
Arquivos CSV	1	1	1
Suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades	1	1	1
Construção dos modelos			
Interface gráfica	1	1	1
Codificação			
Assistentes para codificação	1	1	1
Variáveis globais	1	1	0
Roteamento condicional	1	1	0
Animação			
Configuração para habilitar/desabilitar	1	1	0
Controle de velocidade	1	1	0
Suporte às diversas unidades de tempo e espaço	1	1	0
Visualização da data/hora	1	1	0
Visualização dos valores instantâneos de variáveis e gráficos	1	1	0
Relatórios			
Padrão	1	1	1
Exportação de dados			
Arquivos texto	1	1	1
Arquivos CSV	1	1	1
Periódica	1	1	0
Geração de estatísticas dos dados de saída	1	1	1
Manutenção do banco de dados	1	1	1
Tempo necessário para construção do modelo	1	1	1
Múltiplas replicações	1	1	1

5.2. Segunda fase: avaliação da qualidade dos *softwares*

Nesta fase, os *softwares* de simulação de eventos discretos classificados na etapa anterior, SS₁ e SS₂, foram analisados com o objetivo de identificar qual deles melhor atende aos critérios essenciais. Para tanto, eles foram avaliados durante a modelagem e execução dos problemas testes de dimensionamento da tancagem de um porto e de dimensionamento da frota de caminhões. A seguir, baseado na percepção adquirida sobre o atendimento aos

critérios essenciais, os *softwares* de simulação foram comparados entre si utilizando o método de análise hierárquica (AHP); por fim, o resultado obtido foi validado por meio da análise de sensibilidade em relação às prioridades identificadas e ao conjunto de critérios.

5.2.1. Desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e experimentos

Os problemas testes de dimensionamento da tancagem de um porto e de dimensionamento da frota de caminhões foram modelados e executados com o objetivo de avaliar o desempenho dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios essenciais (apresentados na tabela 49) e de comparar as medidas de desempenho geradas pelos modelos de simulação. As próximas seções detalharão os resultados obtidos para cada um destes problemas testes.

5.2.1.1. Dimensionamento da tancagem de um porto

O problema teste de dimensionamento da tancagem de um porto foi modelado, utilizando-se os *softwares* de simulação SS₁ e SS₂, conforme os dados e o modelo conceitual apresentados no capítulo anterior (figuras 7 e 8, respectivamente). Inicialmente, o modelo foi executado com a configuração de dados determinísticos para os padrões de chegada dos navios e caminhões-tanque e de atendimento (carregamento e descarregamento do tanque) para validar os modelos desenvolvidos e comparar os resultados gerados (cenário inicial). Para tanto, adotou-se que os navios chegam a cada 2 dias e os caminhões-tanque a cada 0,001579 dia; cada navio é descarregado em 56 horas e, cada caminhão-tanque, carregado em 29 minutos. Também foi definido o volume máximo do tanque em 120.000 toneladas e disponibilizadas 10 baias para os caminhões-tanque e um berço para os navios. Por fim, foi executada uma replicação em um horizonte de 720 horas de operação do porto.

Os resultados consolidados na tabela 50 ratificam que os modelos desenvolvidos por meio dos *softwares* SS₁ e SS₂ apresentam um comportamento semelhante, pois as medidas de desempenho coletadas resultaram em valores próximos, validando-os para a continuidade dos experimentos, que passou a utilizar dados baseados em distribuições de probabilidade para os padrões de chegada dos navios e caminhões-tanque e para o tempo de descarregamento dos navios (carregamento do tanque).

Assim, conforme os dados do problema teste proposto, os modelos desenvolvidos foram parametrizados para que os navios chegassem regidos pela distribuição exponencial, com média de 3 dias; já o padrão de chegada dos caminhões-tanque, foi configurado para 0,001875 dia (distribuição exponencial); o carregamento do tanque seguiu a distribuição normal com média de 48 horas e desvio padrão de 12 horas por navio, e o descarregamento, uma taxa constante de 20 minutos por caminhão-tanque; foram ainda disponibilizadas 10 baias e um berço para atracação. Os modelos de simulação foram configurados para executar 999 replicações com horizonte de 720 horas (30 dias) de operação do porto.

Foram configurados 7 cenários, adotando-se diferentes volumes máximos para o tanque do porto, com o objetivo de avaliar os impactos desta configuração na fila média dos navios (tempo médio aguardado para carregar o tanque) e dos caminhões-tanque (tempo médio aguardado para descarregar o tanque), dimensionando a tancagem e garantindo a continuidade da operação do porto, além de identificar a infra-estrutura portuária necessária para acomodar cada um dos cenários (áreas de estacionamento, número de baias e de berços). Inicialmente, adotou-se o volume máximo de 400.000 toneladas (tabela 51), reduzindo-o gradativamente para 160.000 (tabela 52), 120.000 (tabela 53), 80.000 (tabela 54), 60.000 (tabela 55), 50.000 (tabela 56) e para 40.000 toneladas (tabela 57), valor mínimo configurável, por corresponder à carga transportada pelos navios.

Tabela 50. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (dados determinísticos para validação do modelo).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baías (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	16,00	19.000,00	77.789,61	65,400	1,40	4	77,750	2.050,42	4.102	88,910	99,980
SS ₂	16,00	18.998,00	77.787,56	62,964	1,40	4	77,669	2.049,38	4.099	88,910	99,980

Tabela 51. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 400.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baías (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,04	16.003,07	41.941,71	47,320	0,55	10	51,740	939,69	12.303	66,490	65,690
SS ₂	10,99	16.000,19	41.134,54	30,085	0,53	8	41,136	913,82	12.870	66,540	66,230

Tabela 52. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 160.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baías (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,03	16.003,12	40.767,21	48,190	0,58	10	51,740	939,69	12.303	65,630	65,690
SS ₂	11,04	16.000,07	41.278,17	32,045	0,59	9	43,441	965,15	12.870	65,790	65,650

Tabela 53. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 120.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baías (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,07	16.003,05	38.132,25	51,250	0,66	12	51,760	939,75	12.303	64,520	65,690
SS ₂	11,06	16.000,08	39.074,48	35,618	0,66	14	43,059	956,61	12.901	65,070	65,940

Tabela 54. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 80.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baias (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	10,97	16.003,14	31.226,07	59,470	0,79	13	51,900	940,83	12.303	62,320	65,640
SS ₂	11,04	16.000,38	32.025,73	43,705	0,81	12	40,586	902,40	12.600	63,100	66,220

Tabela 55. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 60.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baias (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,07	16.002,95	25.807,90	69,140	0,96	13	51,280	918,14	12.303	62,010	66,150
SS ₂	11,10	16.000,36	25.846,83	53,037	0,99	13	42,312	940,32	10.776	61,840	66,000

Tabela 56. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 50.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baias (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,17	16.003,10	21.624,47	76,160	1,07	14	50,400	898,36	12.303	61,420	66,390
SS ₂	11,14	16.000,25	21.564,88	59,581	1,11	13	42,234	939,43	12.892	60,390	66,120

Tabela 57. Resultados obtidos para as medidas de desempenho (volume máximo de 40.000 toneladas).

<i>Software</i>	Média de navios gerados	Média de caminhões-tanque gerados	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Número de navios aguardando para carregar o tanque		Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)	Número de caminhões aguardando para descarregar o tanque		Taxa média de ocupação do berço (%)	Taxa média de ocupação das baias (%)
					Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11,13	16.002,91	16.294,87	86,050	1,23	12	50,630	905,23	12.303	59,790	66,250
SS ₂	10,86	16.000,56	16.142,08	63,081	1,12	15	43,169	960,20	11.213	59,490	65,700

Ao analisar os resultados apresentados nas tabelas 51 a 57, foram observados valores semelhantes para as médias de navios e caminhões-tanque, gerados por ambos os *softwares*, assim como o volume médio do tanque, o número médio de navios aguardando o carregamento, o número médio de caminhões-tanque aguardando o descarregamento e as taxas médias de ocupação das baías e do berço. Já em relação ao número máximo de navios e caminhões-tanque aguardando para carregar e descarregar o tanque, os *softwares* SS₁ e SS₂ geraram estatísticas distintas, mas esse resultado foi consequência do comportamento aleatório dos modelos de simulação, que gerou valores extremos diferentes.

Entretanto, foi constatada uma discrepância entre os tempos médios em fila para os navios e para os caminhões-tanque. Assim, os modelos utilizados no cenário inicial (validação), com dados de entrada determinísticos, foram alterados para registrar em um arquivo texto os momentos em que os navios e caminhões-tanque entravam e saíam da fila para carregamento e descarregamento do tanque, respectivamente, para analisar a origem das diferenças encontradas nestas estatísticas, visto que as demais medidas de desempenho apresentaram valores próximos.

Dessa forma, foi identificado que *software* SS₁ calculou a média das diferenças obtidas entre os tempos em que as entidades (navios ou caminhões-tanque) saíram e entraram em fila; foram desconsiderados os dados referentes às que ainda estavam em fila no momento em que a simulação foi finalizada. Já o *software* SS₂, também calculou a média dos resultados obtidos por meio da diferença entre o tempo em que as entidades saíram e entraram em fila; entretanto, este utilizou o horizonte de simulação como tempo de saída para as que ainda estavam em fila quando a simulação foi finalizada; considerou também para o cálculo da média, aquelas que não permaneceram em fila. As tabelas 58 e 59 apresentam os cálculos realizados para determinar o tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque no cenário inicial (validação do modelo) para os *softwares* SS₁ e SS₂, respectivamente.

Tabela 58. Dados coletados para o cenário inicial – validação do modelo (SS₁).

Navio gerado	Entrada na fila (h) (A)	Saída da fila (h) (B)	Fila (h) (B-A)
1	0,0000	0,0000	-
2	48,0000	56,0000	8,0000
3	96,0000	112,0000	16,0000
4	144,0000	168,0000	24,0000
5	192,0000	224,0000	32,0000
6	240,0000	280,0000	40,0000
7	288,0000	336,0000	48,0000
8	336,0000	392,0000	56,0000
9	384,0000	463,8601	79,8601
10	432,0000	541,1935	109,1935
11	480,0000	618,5268	138,5268
12	528,0000	695,8601	167,8601
13	576,0000	-	-
14	624,0000	-	-
15	672,0000	-	-
16	720,0000	-	-
Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque			65,4037

Tabela 59. Dados coletados para o cenário inicial – validação do modelo (SS₂).

Navio gerado	Entrada na fila (h) (A)	Saída da fila (h) (B)	Fila (h) (B-A)
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	48,0000	56,0000	8,0000
3	96,0000	112,0000	16,0000
4	144,0000	168,0000	24,0000
5	192,0000	224,0000	32,0000
6	240,0000	280,0000	40,0000
7	288,0000	336,0000	48,0000
8	336,0000	392,0000	56,0000
9	384,0000	463,8547	79,8547
10	432,0000	541,1875	109,1875
11	480,0000	618,5203	138,5203
12	528,0000	695,8531	167,8531
13	576,0000	720,0000	144,0000
14	624,0000	720,0000	96,0000
15	672,0000	720,0000	48,0000
16	720,0000	720,0000	0,0000
Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque			62,9635

Assim, ao calcular o tempo médio que os navios aguardam em fila para carregar o tanque com os dados gerados pelo *software* SS₂, utilizando-se o mesmo procedimento identificado para o *software* SS₁, foi obtido um valor semelhante (tabela 60) ao apresentado na tabela 58. Esses resultados permitiram concluir que os modelos de simulação desenvolvidos com os *softwares* SS₁ e SS₂ apresentam o mesmo comportamento, conforme observado na comparação das medidas de desempenho.

Tabela 60. Cálculo do tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque para o *software* SS₂, efetuado conforme o procedimento realizado pelo *software* SS₁.

Navio gerado	Entrada na fila (h) (A)	Saída da fila (h) (B)	Fila (h) (B-A)
1	0,0000	0,0000	-
2	48,0000	56,0000	8,0000
3	96,0000	112,0000	16,0000
4	144,0000	168,0000	24,0000
5	192,0000	224,0000	32,0000
6	240,0000	280,0000	40,0000
7	288,0000	336,0000	48,0000
8	336,0000	392,0000	56,0000
9	384,0000	463,8547	79,8547
10	432,0000	541,1875	109,1875
11	480,0000	618,5203	138,5203
12	528,0000	695,8531	167,8531
13	576,0000	-	-
14	624,0000	-	-
15	672,0000	-	-
16	720,0000	-	-
Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque			65,4014

As tabelas 61 e 62, a seguir, consolidam os resultados obtidos para o tempo médio que navios e caminhões-tanque aguardam para carregar ou descarregar o tanque, respectivamente, para cada um dos cenários simulados, configurados com diferentes volumes máximos para o tanque com o objetivo de dimensionar a tancagem do porto.

Tabela 61. Resultados consolidados para o *software* SS₁.

Cenário	Volume máximo do tanque (ton)	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)
1	400.000	41.941,71	47,32	51,74
2	160.000	40.767,21	48,19	51,74
3	120.000	38.132,25	51,25	51,76
4	80.000	31.226,07	59,47	51,90
5	60.000	25.807,90	69,14	51,28
6	50.000	21.624,47	76,16	50,40
7	40.000	16.294,87	86,05	50,63

Tabela 62. Resultados consolidados para o *software* SS₂.

Cenário	Volume máximo do tanque (ton)	Volume médio do tanque (ton)	Tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (h)	Tempo médio que os caminhões aguardam para descarregar o tanque (h)
1	400.000	41.134,54	30,09	41,14
2	160.000	41.278,17	32,05	43,44
3	120.000	39.074,48	35,62	43,06
4	80.000	32.025,73	43,71	40,59
5	60.000	25.846,83	53,04	42,31
6	50.000	21.564,88	59,58	42,23
7	40.000	16.142,08	63,08	43,17

Foi possível notar nos cenários 1, 2 e 3, uma pequena redução no volume médio do tanque para um decréscimo significativo em seu volume máximo. Entretanto, a partir do quarto cenário, observou-se uma redução acentuada no volume médio do tanque (figura 13); nesse mesmo cenário, também foi verificado um aumento significativo no tempo médio que os navios aguardam para carregar o tanque (figura 14). Esse comportamento foi decorrente da redução no volume máximo do tanque, pois os navios precisavam satisfazer a condição

imposta pelo problema teste que garante que a carga transportada pelo navio, mais o volume do tanque, seja sempre igual ou menor ao volume máximo permitido; assim, mesmo com o berço disponível para atracação, o navio aguarda em fila a operação de descarregamento efetuada pelos caminhões, aliviando o tanque, para iniciar seu carregamento somente quando o volume disponível for igual ou superior a sua carga transportada. Já o tempo médio que os caminhões-tanque aguardam para descarregar o tanque, não foi sensível à redução em sua capacidade, dado que existe carga disponível para a continuidade desta operação (figura 15).

Figura 13. Volume médio do tanque para cada um dos cenários simulados.

Figura 14. Fila média dos navios para cada um dos cenários simulados.

Figura 15. Fila média dos caminhões-tanque para cada um dos cenários simulados.

Os dados apresentados permitiram concluir que o dimensionamento da tancagem com capacidade máxima de 120.000 toneladas mantém o volume médio próximo à carga transportada pelos navios (40.000 toneladas) e não causa impactos significativos à fila de navios (tempo médio que estes aguardam para carregar o tanque); garante também a continuidade da operação, pois a redução do volume máximo para um valor próximo a carga transportada pelo navio poderia causar a descontinuidade na operação, dado que os navios iniciariam o carregamento somente quando o volume do tanque estivesse próximo a zero; além disso, os caminhões-tanque também precisariam aguardar que o volume do tanque fosse igual ou maior que sua capacidade (25 toneladas) para iniciar a operação de descarregamento. Os resultados obtidos também permitiram identificar os impactos deste dimensionamento no sistema, em relação à área de estacionamento necessária para acomodar a fila de caminhões-tanque e às taxas de ocupação do berço e das baias.

5.2.1.2. Dimensionamento da frota de caminhões

O problema teste de dimensionamento da frota de caminhões foi modelado, utilizando-se os *softwares* de simulação SS₁ e SS₂ conforme os dados e o modelo conceitual

apresentados no capítulo anterior (figuras 11 e 12, respectivamente). Inicialmente, o modelo foi executado com a configuração de dados determinísticos para os padrões de atendimento na fábrica (pesagem e carregamento) e no porto (pesagem e descarregamento) para validação dos modelos desenvolvidos e comparação dos resultados gerados (cenário inicial). Para tanto, adotou-se uma frota homogênea, com caminhões chegando ao sistema a cada um minuto, limitados em 10 veículos; o tempo de pesagem na fábrica e no porto é de 10 minutos e são gastos 120 minutos para o carregamento e 240 minutos para o descarregamento; o deslocamento entre a fábrica e o porto é de 240 minutos, independentemente do sentido. Também foram configurados 5 carregadores e 7 descarregadores, sendo executada uma replicação em um horizonte de 720 horas (30 dias).

Os resultados consolidados nas tabelas 63 e 64 confirmaram que os modelos desenvolvidos por meio dos *softwares* SS₁ e SS₂ apresentaram um comportamento semelhante, pois as medidas de desempenho resultaram em valores próximos, validando-os para a continuidade dos experimentos, que passou a utilizar dados baseados em distribuições probabilísticas para os padrões de atendimento na pesagem, no carregamento na fábrica e no descarregamento no porto; além do padrão de chegada dos caminhões que compõem a frota.

Assim, conforme os dados do problema teste proposto, os modelos desenvolvidos foram parametrizados para que os caminhões chegassem regidos pela distribuição exponencial, com média de 10 minutos; a pesagem foi configurada com tempo médio de 10 minutos e desvio padrão de 3 minutos (distribuição normal); o tempo de atendimento no posto de carga foi caracterizado segundo uma distribuição triangular, com média de 120 minutos (mínimo de 60 e máximo de 180 minutos). Já o tempo de descarregamento no porto, foi definido com média de 300 minutos, com mínimo de 240 e máximo de 360 minutos (distribuição triangular); o tempo de deslocamento entre a fábrica e o porto foi configurado como constante (240 minutos); foram ainda disponibilizados 5 carregadores e 7

descarregadores. Por fim, os modelos de simulação foram configurados para executar 999 replicações com horizonte de 720 horas de operação, para avaliar a carga total transportada pela frota de caminhões e as filas médias nas balanças (tempo médio de espera nas balanças), posto de carga (tempo médio de espera no posto de carga da fábrica) e posto de descarga (tempo médio de espera no posto de descarga do porto).

Inicialmente, foram configurados 3 cenários, adotando-se diferentes frotas, com o objetivo único de avaliar a carga total transportada. Para tanto, foi definida uma frota com 10 veículos (tabelas 65 e 66), aumentando-a para 20 (tabelas 67 e 68) e para 30 veículos (tabelas 69 e 70). Ao avaliar a carga transportada, pôde-se observar uma evolução pouco expressiva no total obtido com 30 caminhões, quando comparado ao resultado gerado por 20 caminhões. Dessa forma, foi executado outro cenário com 25 veículos (tabelas 71 e 72), no qual foi verificado o mesmo volume transportado pela frota com 30 caminhões; assim, identificou-se que o dimensionamento da frota estaria entre 20 e 25; por fim, um novo cenário com 23 veículos foi estabelecido (tabelas 73 e 74).

Ao analisar os resultados apresentados nas tabelas 65 a 74, foram observados valores próximos para todas as medidas de desempenhos geradas pelos *softwares* SS₁ e SS₂, tais como: a carga total transportada; o tempo médio de espera e o número médio de caminhões aguardando as balanças na fábrica e no porto; o tempo médio de espera e o número médio de caminhões aguardando o carregamento na fábrica e o descarregamento no porto; e as taxas médias de ocupação nas balanças e nos postos de carga e de descarga. Em relação ao número máximo de caminhões aguardando as balanças, o posto de carga na fábrica e o de descarga no porto, existiram diferenças, mas estas foram originadas pelo comportamento aleatório dos modelos de simulação, que geraram valores extremos diferentes. Dessa forma, foi possível concluir que os modelos apresentaram um comportamento semelhante para o problema teste, visto a proximidade das medidas de desempenho geradas.

Tabela 63. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (validação do modelo).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	12.425	10	0,80	0,01	9	0,69	0,01	5	11,74	28,12
SS ₂	12.425	10	0,80	0,01	9	0,69	0,01	5	11,74	28,12

Tabela 64. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (validação do modelo).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	0,00	0,00	0	0,60	0,01	3	11,57	39,68
SS ₂	0,00	0,00	0	0,60	0,01	3	11,57	39,68

Tabela 65. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 10 caminhões).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
				Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	11.650	10	0,92	0,01	8	0,78	0,01	5	10,93	26,16
SS ₂	11.650	10	0,91	0,01	7	0,75	0,01	5	10,92	26,18

Tabela 66. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 10 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	0,73	0,01	4	1,33	0,01	3	10,85	46,30
SS ₂	0,72	0,01	4	1,32	0,01	3	10,84	46,29

Tabela 67. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 20 caminhões).

Software	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo	(min)	Médio	Máximo		
SS ₁	22.950	20	1,36	0,03	13	2,22	0,05	12	21,55	51,63
SS ₂	22.900	20	1,37	0,03	12	2,23	0,05	12	21,54	51,64

Tabela 68. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 20 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,06	0,02	4	11,48	0,26	10	21,36	91,18
SS ₂	1,06	0,02	4	11,49	0,25	10	21,37	91,19

Tabela 69. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 30 caminhões).

Software	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo	(min)	Médio	Máximo		
SS ₁	24.950	30	1,98	0,05	16	5,49	0,13	20	23,58	56,49
SS ₂	24.900	30	1,99	0,05	17	5,47	0,13	19	23,59	56,50

Tabela 70. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 30 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,26	0,03	4	358,01	8,33	15	23,37	99,00
SS ₂	1,27	0,03	4	356,55	8,32	16	23,36	99,01

Tabela 71. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 25 caminhões).

Software	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo	(min)	Médio	Máximo		
SS ₁	24.950	25	1,81	0,04	16	3,95	0,09	15	23,45	56,22
SS ₂	24.925	25	1,82	0,04	15	3,93	0,09	15	23,48	56,23

Tabela 72. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 25 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,27	0,03	4	148,55	3,45	11	23,28	98,98
SS ₂	1,26	0,03	4	148,42	3,45	11	23,26	98,99

Tabela 73. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 23 caminhões).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
				Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	24.875	23	1,64	0,04	15	3,20	0,07	14	23,36	55,96
SS ₂	24.825	23	1,66	0,04	13	3,19	0,07	14	23,35	55,94

Tabela 74. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 23 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,21	0,03	4	67,57	1,57	10	23,15	98,71
SS ₂	1,22	0,03	4	67,58	1,56	10	23,16	98,72

As medidas de desempenho geradas pelos *softwares* SS₁ e SS₂ para os tempos médios em fila não apresentaram discrepâncias, como ocorreu no problema teste do dimensionamento da tancagem do porto. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do dimensionamento da frota de caminhões ser um problema com ciclo fechado, ou seja, um conjunto de entidades entra no sistema e nele permanece até o final de sua execução, diferentemente do primeiro problema abordado, no qual os tempos médios em fila estão em função de um padrão de chegadas exponencial; neste segundo problema, as medidas de desempenho estão em função de padrões de atendimentos mais comportados, como a distribuição normal e a triangular (somente no momento inicial as entidades chegaram regidas por uma distribuição exponencial).

Os resultados consolidados para o problema de dimensionamento da frota de caminhões estão consolidados nas tabelas 75 e 76. Assim, como foi apresentado anteriormente, foi observada uma evolução pouco expressiva na carga total transportada entre os cenários 2 e 3, para um acréscimo de 10 caminhões, totalizando 30 veículos. A seguir, constatou-se que a redução da frota para 25 caminhões (cenário 4) mantinha o mesmo volume transportado no cenário anterior. Por fim, identificou-se o dimensionamento adequado da frota com 23 veículos (cenário 5), pois este trouxe um aumento significativo na carga total transportada, em relação à frota com 20 caminhões, e um valor próximo ao observado no cenário com 25 veículos.

Ao avaliar as medidas de desempenho geradas, foi observado que o tempo médio que os caminhões aguardam nas balanças (fábrica e porto) e no posto de carga é pouco significativo para o sistema, pois é da ordem de alguns minutos; entretanto, o tempo médio que os caminhões aguardam no posto de descarga aumenta rapidamente em relação ao acréscimo de caminhões circulando no sistema. Assim, foi possível identificar um gargalo na operação de descarregamento, ratificado pela taxa média de ocupação, próxima a 100%.

Tabela 75. Resultados consolidados para o *software* SS₁.

Cenário	Frota	Carga Transportada (ton)	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)
1	10	11.650	0,92	0,78	0,73	1,33
2	20	22.950	1,36	2,22	1,06	11,48
5	23	24.875	1,64	3,20	1,21	67,57
4	25	24.950	1,81	3,95	1,27	148,55
3	30	24.950	1,98	5,49	1,26	358,01

Tabela 76. Resultados consolidados para o *software* SS₂.

Cenário	Frota	Carga Transportada (ton)	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)
1	10	11.650	0,91	0,75	0,72	1,32
2	20	22.900	1,37	2,23	1,06	11,49
5	23	24.825	1,66	3,19	1,22	67,58
4	25	24.925	1,82	3,93	1,26	148,42
3	30	24.900	1,99	5,47	1,27	356,55

Dessa forma, outros cenários foram avaliados, considerando-se a mesma parametrização dos modelos apresentada anteriormente, com exceção do número de descarregadores, que foram aumentados de 7 para 9. Assim, um novo cenário com 23 caminhões foi executado (tabelas 77 e 78), trazendo um aumento significativo na carga total transportada. A seguir, a frota foi dimensionada em 25 (tabelas 79 e 80), 30 (tabelas 81 e 82) e 35 veículos (tabelas 83 e 84). Como não foi constado um aumento expressivo no volume transportado com 30 ou 35 veículos, foi modelado outro cenário com 29 caminhões (tabelas 85 e 86).

Tabela 77. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 23 caminhões).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
				Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	26.450	23	1,67	0,04	15	3,38	0,08	14	24,91	59,69
SS ₂	26.500	23	1,69	0,04	15	3,41	0,09	14	24,92	59,70

Tabela 78. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 23 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,30	0,03	4	4,37	0,11	8	24,70	82,02
SS ₂	1,29	0,03	4	4,36	0,10	8	24,69	82,01

Tabela 79. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 25 caminhões).

Software	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo	(min)	Médio	Máximo		
SS ₁	28.650	25	1,78	0,06	16	3,88	0,11	15	26,97	64,63
SS ₂	28.700	25	1,77	0,05	13	3,86	0,10	15	26,98	64,64

Tabela 80. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 25 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,38	0,04	4	7,06	0,20	9	26,75	88,81
SS ₂	1,37	0,04	4	7,04	0,19	8	26,74	88,82

Tabela 81. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 30 caminhões).

Software	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
			(min)	Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	31.975	30	2,31	0,07	16	7,34	0,22	20	30,06	72,08
SS ₂	31.950	30	2,29	0,06	14	7,27	0,21	19	30,09	72,05

Tabela 82. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 30 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,60	0,05	4	74,42	2,22	12	29,80	98,83
SS ₂	1,59	0,05	4	74,44	2,21	11	29,81	98,84

Tabela 83. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 35 caminhões).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
				Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	32.025	35	2,52	0,08	18	9,10	0,28	23	30,22	72,41
SS ₂	32.000	35	2,56	0,07	17	9,04	0,27	22	30,21	72,39

Tabela 84. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 35 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,62	0,05	4	235,82	7,05	13	29,96	98,94
SS ₂	1,61	0,05	4	235,33	7,03	12	29,95	98,97

Tabela 85. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para a fábrica (frota com 29 caminhões).

<i>Software</i>	Carga Transportada (ton)	Frota	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando a balança da fábrica		Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Número de caminhões aguardando o carregamento na fábrica		Taxa de ocupação da balança da fábrica (%)	Taxa de ocupação do posto de carga da fábrica (%)
				Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	31.775	29	2,13	0,05	16	6,30	0,19	19	29,93	71,72
SS ₂	31.800	29	2,14	0,06	16	6,27	0,19	19	29,94	71,69

Tabela 86. Resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas para o porto (frota com 29 caminhões).

<i>Software</i>	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Número de caminhões aguardando a balança do porto		Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)	Número de caminhões aguardando o descarregamento no porto		Taxa de ocupação da balança do porto (%)	Taxa de ocupação do posto de descarga do porto (%)
		Médio	Máximo		Médio	Máximo		
SS ₁	1,56	0,04	4	46,61	1,38	11	29,65	98,43
SS ₂	1,56	0,05	4	46,68	1,38	11	29,68	98,45

Os resultados obtidos para as medidas de desempenho geradas pelos modelos de simulação apresentaram valores semelhantes, validando-os. Foi possível observar que a configuração de novos postos de descarga aumentou a carga transportada de aproximadamente 24.850 para cerca de 26.475 toneladas para uma mesma frota de veículos (cenário 6), ou seja, foi confirmado o gargalo identificado na operação de descarregamento, que inviabilizava o aumento do número de caminhões da frota, dado que estes ficariam em fila, aguardando o atendimento no posto de descarga. Assim, a frota foi novamente dimensionada em 25 (cenário 7), 30 (cenário 8) e 35 veículos (cenário 9); entretanto, pôde-se notar um inexpressivo aumento no volume total transportado ao avaliar os dois últimos cenários. Dessa forma, um novo cenário com 29 caminhões foi executado.

Identificou-se que o dimensionamento da frota apresentado neste último cenário era mais adequado, pois a carga total transportada foi próxima à obtida com 30 caminhões e significativamente maior que o resultado gerado com 25 veículos. Além disso, os tempos médios de espera nas balanças, nos postos de carga e de descarga mantiveram-se próximos nestes cenários. As tabelas 87 e 88 apresentam os novos resultados consolidados para o problema de dimensionamento da frota de caminhões, considerando-se 9 postos de descarga no porto.

Tabela 87. Novos resultados consolidados para o *software* SS₁.

Cenário	Frota	Carga Transportada (ton)	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)
6	23	26.450	1,67	3,38	1,30	4,37
7	25	28.650	1,78	3,88	1,38	7,06
10	29	31.775	2,13	6,30	1,56	46,61
8	30	31.975	2,31	7,34	1,60	74,42
9	35	32.025	2,52	9,10	1,62	235,82

Tabela 88. Novos resultados consolidados para o *software* SS₂.

Cenário	Frota	Carga Transportada (ton)	Tempo médio de espera na balança da fábrica (min)	Tempo médio de espera no posto de carga da fábrica (min)	Tempo médio de espera na balança do porto (min)	Tempo médio de espera no posto de descarga do porto (min)
6	23	26.500	1,69	3,41	1,29	4,36
7	25	28.700	1,77	3,86	1,37	7,04
10	29	31.800	2,14	6,27	1,56	46,68
8	30	31.950	2,29	7,27	1,59	74,44
9	35	32.000	2,56	9,04	1,61	235,33

Ao aumentar o número de postos de descarga, aumentou-se a capacidade do sistema, visto que foram identificados recursos ociosos nas operações de pesagem e de carregamento, e um gargalo na operação de descarregamento. Entretanto, neste cenário 10, ainda existe um desbalanceamento na capacidade dos componentes do sistema, pois as balanças estão ocupadas 30% do tempo (em média) e os postos de carga e descarga, 72% e 99%, respectivamente. Nesse momento, em um problema real, outros cenários seriam avaliados, além da configuração de novos recursos nos postos de descarga, que poderiam estar limitados fisicamente pela área disponível; outra possibilidade, por exemplo, seria a análise dos impactos da redução nos postos de carga para balancear a capacidade do sistema.

A figura 16 apresenta a evolução da carga total transportada; o gráfico foi dividido em dois segmentos: a primeira parte corresponde aos cenários 1 a 5; a segunda, aos cenários 6 a 10. Assim, foi possível observar uma estagnação no volume transportado, a partir da frota dimensionada em 23 caminhões, para a parametrização do modelo de simulação, conforme os dados do problema teste (parte 1). A configuração de dois novos postos de descarga no porto possibilitou o aumento da frota de 23 para 29 caminhões e a apuração da carga total em aproximadamente 31.787 toneladas (parte 2), superior ao volume estimado inicialmente em cerca de 24.850 toneladas. Entretanto, também foi possível notar a evolução inexpressiva da

carga transportada a partir desse cenário, conforme pode ser verificado nos cenários executados com 30 e 35 veículos. As figuras 17 e 18 sumarizam o tempo médio de espera (fila) na balança e no posto de carga da fábrica, respectivamente para cada um dos cenários executados. Pôde-se observar um crescimento pouco significativo das filas médias, quando comparados os resultados obtidos para os cenários extremos, com 10 e 35 caminhões; nestes gráficos, os cenários 1 a 5 estão representados pelo segmento identificado como parte 1, e os cenários 6 a 10, pelo segmento parte 2.

Figura 16. Carga total transportada para cada um dos cenários simulados.

Figura 17. Fila média na balança da fábrica para cada um dos cenários simulados.

Figura 18. Fila média no posto de carga para cada um dos cenários simulados.

Por fim, as figuras 19 e 20, apresentam os tempos médios de espera (fila média) na balança e no posto de descarga do porto, respectivamente para cada um dos cenários simulados. Esses gráficos foram identificados segundo a mesma nomenclatura anteriormente apresentada (parte 1, correspondente aos cenários 1 a 5, e parte 2, aos cenários 6 a 10). Foi possível notar uma pequena evolução da fila média na balança do porto, quando comparados os resultados gerados para a frota com 10 e 35 veículos; já a fila média no posto de descarga, evoluiu rapidamente, a partir dos cenários com 23 (parte 1) e 29 (parte 2) caminhões, indicando um gargalo nesta operação.

Figura 19. Fila média na balança do porto para cada um dos cenários simulados.

Figura 20. Fila média no posto de descarga para cada um dos cenários simulados.

5.2.1.3. Comentários gerais dos *softwares*

Foi possível, a partir do desenvolvimento e da realização de experimentos com os modelos de simulação construídos para os problemas de dimensionamento da tancagem de um porto e de dimensionamento da frota de caminhões, avaliar a qualidade dos *softwares* de simulação SS₁ e SS₂, segundo os critérios essenciais e a percepção de suas características. Dessa forma, inicialmente, foi verificado que ambos os *softwares* suportavam a simulação de eventos discretos.

A importação de dados a partir de arquivos texto e CSV foi configurada no *software* SS₂, utilizando-se comandos de leitura extremamente intuitivos, por meio da camada de processos (*processing*); já no *software* SS₁, a importação de dados foi implementada com auxílio da interface gráfica, com os objetos específicos para leitura de dados. Pôde-se constatar que, de uma maneira geral, as funções de leitura e escrita foram modeladas mais facilmente no *software* SS₂. Em relação às distribuições de probabilidades, ambos os *softwares* permitiram configurar as principais distribuições teóricas e empíricas; entretanto, foi notado um diferencial no *software* SS₂, pois este suportou a definição do ciclo de números

aleatórios que seria utilizado, através do assistente para codificação, possibilitando selecionar entre os 100 ciclos independentes disponíveis; além disso, ele também permitiu a escolha da semente que seria utilizada para gerar os ciclos de números aleatórios.

Foi verificado que a interface gráfica do *software* SS₁ é extremamente amigável e intuitiva para a construção dos modelos de simulação. Os objetos disponíveis estão agrupados em categorias e é possível arrastá-los, copiá-los e colá-los, utilizando-se o *mouse*; além de editar suas propriedades. O desenvolvimento do modelo foi análogo à construção de um diagrama de blocos, ou seja, somente foi necessário transcrever o modelo conceitual. Embora a interface gráfica do *software* SS₂ também fosse amigável, possibilitando selecionar os objetos em um menu lateral e configurar suas propriedades por meio de uma tabela, a abordagem em camadas para o desenvolvimento do modelo e a associação com a animação tornaram a modelagem menos intuitiva e mais trabalhosa; além disso, a biblioteca de ícones padrão é separada por categorias, dificultando a seleção de imagens de grupos diferentes para a representação dos objetos, entidades e recursos do sistema. Identificou-se também que o *software* SS₂ permite lidar com problemas que tratam de distâncias e de velocidades de deslocamento dos recursos e das entidades; entretanto, essas características não são comumente abordadas nos problemas em sistemas logísticos que utilizam, principalmente, estatísticas ligadas ao tempo gasto com a execução das tarefas (inclusive deslocamentos).

Em relação aos assistentes para codificação, os *softwares* de simulação avaliados possibilitaram configurar funções matemáticas, distribuições de probabilidades, variáveis relacionadas às replicações, entidades e data/hora, entre outras funções internas; o assistente do *software* SS₁ permitiu adicionalmente acessar as estatísticas geradas, como número de entidades processadas e em processamento, entidades em fila e em atendimento, número de recursos configurados e ocupados, entre outras.

Ambos os *softwares* suportaram a configuração e a manipulação de variáveis globais durante a realização dos experimentos; também foi constatado que o *software* SS₂ possibilitava definir se a variável global seria um número inteiro ou real (as variáveis no *software* SS₁, por padrão, são números reais), utilizando-se a memória de maneira mais eficiente.

O roteamento condicional suportado pelo *software* SS₁ possibilitou a modelagem de cenários típicos em sistemas logísticos, que atendiam mais de uma condição simultaneamente (como a disponibilidade de recursos e o resultado verdadeiro para um teste lógico) ou que buscavam e removiam entidades em fila baseado em seus atributos; já no *software* SS₂, foi necessário recorrer à codificação (programação) para desenvolver um modelo com comportamento semelhante.

Entre os critérios para avaliação da animação, pôde-se verificar que os *softwares* SS₁ e SS₂ possibilitavam habilitá-la ou desabilitá-la. A velocidade da animação foi ajustada no *software* SS₁ por meio do menu de execução ou da barra de controle de velocidade; já no *software* SS₂, somente foi possível configurá-la por meio da barra de controle de velocidade; para ajustar a velocidade inicial, foi necessário recorrer à codificação (programação), aplicando-se o comando juntamente à lógica de inicialização do modelo. Ambos os *softwares* suportaram a configuração de diferentes unidades de tempo e espaço, ou seja, os dados puderam ser utilizados sem a necessidade de conversões. Por fim, a visualização da data/hora, além dos valores correntes para variáveis e gráficos, foi mais flexível por intermédio do *software* SS₁, que implementa diversos objetos e permite a visualização dessas informações em tempo real durante a execução do modelo.

O relatório padrão gerado pelo *software* SS₁ apresentou os dados de forma organizada, separando as estatísticas para as entidades, filas, recursos e variáveis e conforme a unidade de tempo padrão configurada para execução (em dias, horas, minutos ou segundos). Diversas

estatísticas foram calculadas para os valores coletados durante as replicações, como o valor médio, o valor mínimo médio, o valor máximo médio, o valor mínimo e o valor máximo. Entretanto, para a visualização das estatísticas relacionadas às variáveis, foi necessário configurar um objeto do tipo *record* durante o desenvolvimento do modelo.

Já o relatório padrão gerado pelo *software* SS₂, apresentou os dados coletados através de tabelas, organizadas segundo os tipos de objetos (loais, recursos, padrões de chegadas, entidades, variáveis, entre outros); essa diagramação facilitou a comparação entre as diferentes estatísticas geradas; além disso, esse *software* também possibilitou selecionar quais colunas seriam visualizadas e a precisão decimal. Entretanto, pôde-se observar que o *software* SS₂ não gerou estatísticas para os valores máximos; assim, foi necessário exportar os dados das replicações executadas para uma planilha eletrônica e classificá-los para encontrar o número máximo de entidades aguardando atendimento nos recursos configurados. Também foi constatado que as estatísticas são apresentadas sempre em minutos, sendo necessária a conversão manual dos valores para outras unidades de tempo. Diferentemente do *software* SS₁, as estatísticas para as variáveis foram geradas sem a necessidade de modelagem de objetos adicionais.

A exportação periódica de dados, a partir de arquivos texto e CSV, foi configurada no *software* SS₂, utilizando-se comandos de escrita extremamente intuitivos, por meio da camada de processos (*processing*); já no *software* SS₁, a exportação de dados foi implementada com auxílio da interface gráfica, com os objetos específicos para escrita de dados. O *software* SS₁ gerou, ainda, diversas estatísticas para os dados de saída na unidade de tempo configurada, sem a necessidade da exportação dos dados e cálculos externos, como foi constatado no *software* SS₂.

Os resultados obtidos em cada uma das replicações executadas pelo *software* SS₂ foram facilmente recuperados e manipulados, pois o mesmo suportou a exportação dos dados

para arquivos CSV, possibilitando importá-los para uma planilha eletrônica ou banco de dados. Embora os dados pudessem ser recuperados e manipulados diretamente, a partir do banco de dados gerado pelo *software* SS₁, essas tarefas foram dificultadas pela necessidade de analisar e compreender a estrutura em que os dados foram organizados.

Foi observado o melhor desempenho do *software* SS₁ em relação ao tempo necessário para a construção dos modelos, segundo a percepção adquirida durante o desenvolvimento e a execução dos experimentos; este foi confirmado pela melhor avaliação obtida para a qualidade dos critérios essenciais relacionados especialmente ao desenvolvimento do modelo. Por fim, ambos os *softwares* suportaram a configuração de múltiplas replicações, entretanto, foi constatado que estas estavam limitadas em 999 no *software* SS₂.

5.2.2. Aplicação do método de análise de hierárquica (AHP)

A estrutura hierárquica do problema de seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, aplicados à análise de sistemas logísticos está apresentada na figura 21. O objetivo do problema foi representado no primeiro nível da estrutura (superior); a seguir, estão os critérios essenciais, identificados por C₁ a C₁₄, conforme descrito na tabela 89. Por fim, foram apresentados os sub-critérios, dos critérios essenciais C₂, C₈ e C₁₀, e a lista de alternativas, composta pelos *softwares* SS₁ e SS₂.

Inicialmente, os critérios essenciais foram comparados par-a-par, expressando suas importâncias relativas, utilizando a escala de julgamentos apresentada anteriormente na tabela 31. Os resultados dessa comparação paritária estão descritos na tabela 90; os valores inteiros (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ou 9) indicam que o critério da linha foi julgado mais importante, quando comparado ao da coluna; já os valores fracionários ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{7}$, $\frac{1}{8}$ e $\frac{1}{9}$), expressam que o critério da coluna foi considerado mais importante, comparativamente ao critério da linha; por fim, o valor 1 foi utilizado quando os critérios possuíam a mesma importância.

Figura 21. Estrutura hierárquica do problema de seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos.

Tabela 89. Identificação adotada para os critérios essenciais.

Critério	Descrição
C ₁	Tipo de simulação
C ₂	Importação de dados
C _{2.1}	Arquivos texto
C _{2.2}	Arquivos CSV
C ₃	Suporte às distribuições teóricas e empíricas de probabilidades
C ₄	Interface gráfica para construção dos modelos
C ₅	Assistentes para codificação
C ₆	Variáveis globais
C ₇	Roteamento condicional
C ₈	Animação
C _{8.1}	Configuração para habilitar/desabilitar
C _{8.2}	Controle de velocidade
C _{8.3}	Suporte às diversas unidades de tempo e espaço
C _{8.4}	Visualização da data/hora
C _{8.5}	Visualização dos valores instantâneos de variáveis e gráficos
C ₉	Relatório padrão
C ₁₀	Exportação de dados
C _{10.1}	Arquivos texto
C _{10.2}	Arquivos CSV
C _{10.3}	Periódica
C ₁₁	Geração de estatísticas dos dados de saída
C ₁₂	Manutenção do banco de dados
C ₁₃	Tempo necessário para construção do modelo
C ₁₄	Múltiplas replicações

A tabela 90 é uma matriz recíproca, ou seja, como foi atribuído 5 ao julgamento J₁₂ (considerando que o critério C₁ tem forte importância sobre o critério C₂), o julgamento J₂₁ deve ser necessariamente $\frac{1}{5}$. Os valores recíprocos não foram apresentados na tabela 90, pois são automaticamente calculados pelo *software* Expert Choice 2000, utilizado para a aplicação do método de análise hierárquica (AHP). A razão de consistência (RC), calculada para a matriz de comparação paritária dos critérios essenciais, foi de 0,08, indicando que os julgamentos foram consistentes ($RC \leq 0,10$).

Tabela 90. Comparação paritária dos critérios essenciais (C₁ a C₁₄).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄
C ₁	1	5	5	7	7	3	3	8	8	5	5	5	9	3
C ₂	-	1	1/3	3	3	1/5	1/5	5	3	1	2	1/5	3	1/5
C ₃	-	-	1	5	3	1/3	1/3	7	5	3	3	1/3	5	1/5
C ₄	-	-	-	1	1	1/7	1/7	3	1/3	1/3	1/3	1/5	3	1/7
C ₅	-	-	-	-	1	1/5	1/5	3	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1/5
C ₆	-	-	-	-	-	1	1	5	3	3	5	3	5	1
C ₇	-	-	-	-	-	-	1	7	3	3	3	3	7	1
C ₈	-	-	-	-	-	-	-	1	1/5	1/5	1/5	1/7	2	1/7
C ₉	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1/3	1/3	1/5	3	1/5
C ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	1	3	1/5
C ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1/3	3	1/5
C ₁₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	7	1
C ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1/7
C ₁₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

$RC = 0,08$

A seguir, os sub-critérios dos critérios essenciais C₂, C₈ e C₁₀ também foram comparados par-a-par, conforme o procedimento realizado para os critérios essenciais (tabelas 91, 92 e 93). As razões de consistência, calculadas pelo *software* Expert Choice 2000 para cada uma das matrizes de comparação paritária, foram, respectivamente, 0,00 (C₂), 0,07 (C₈) e 0,08 (C₁₀).

Tabela 91. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C₂.

	C _{2.1}	C _{2.2}
C _{2.1}	1	5
C _{2.2}	-	1

$RC = 0,00$

Tabela 92. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C_8 .

	$C_{8.1}$	$C_{8.2}$	$C_{8.3}$	$C_{8.4}$	$C_{8.5}$
$C_{8.1}$	1	1	1/5	3	1/3
$C_{8.2}$	-	1	1/3	3	1/3
$C_{8.3}$	-	-	1	7	5
$C_{8.4}$	-	-	-	1	1/5
$C_{8.5}$	-	-	-	-	1
$RC = 0,07$					

Tabela 93. Comparação paritária dos sub-critérios do critério essencial C_{10} .

	$C_{10.1}$	$C_{10.2}$	$C_{10.3}$
$C_{10.1}$	1	4	1/3
$C_{10.2}$	-	1	1/5
$C_{10.3}$	-	-	1
$RC = 0,08$			

Por fim, os *softwares* SS_1 e SS_2 foram avaliados comparativamente em relação a cada um dos critérios e sub-critérios, da mesma maneira que foi realizado o procedimento para os critérios essenciais. As tabelas 94 a 99, a seguir, apresentam as comparações paritárias e as razões de consistência calculadas pelo *software* Expert Choice 2000 para cada uma das matrizes.

Tabela 94. Comparação paritária dos *softwares* SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_1 (a), $C_{2.1}$ (b), $C_{2.2}$ (c) e C_3 (d).

<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>		
SS ₁	1	1	SS ₁	1	1/3	SS ₁	1	1/3	SS ₁	1	1/2
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>		
(a)			(b)			(c)			(d)		

Tabela 95. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C₄ (a), C₅ (b), C₆ (c) e C₇ (d).

SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂		
SS ₁	1	5	SS ₁	1	3	SS ₁	1	1/3	SS ₁	1	5
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>		
(a)			(b)			(c)			(d)		

Tabela 96. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C_{8.1} (a), C_{8.2} (b), C_{8.3} (c) e C_{8.4} (d).

<hr/>			<hr/>			<hr/>			<hr/>		
	SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
SS ₁	1	1	SS ₁	1	3	SS ₁	1	1	SS ₁	1	3
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>		
(a)			(b)			(c)			(d)		

Tabela 97. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C_{8.5} (a), C₉ (b) e C_{10.1} (c).

SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂		
SS ₁	1	3	SS ₁	1	7	SS ₁	1	1/2
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>		
(a)			(b)			(c)		

Tabela 98. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C_{10.2} (a), C_{10.3} (b) e C₁₁ (c).

SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂			SS ₁ SS ₂		
SS ₁	1	1/2	SS ₁	1	1/2	SS ₁	1	5
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>		
(a)			(b)			(c)		

5.2.3. Análise de sensibilidade

Após a seleção do *software* SS_1 , utilizando-se o método de análise hierárquica (AHP), é importante analisar a sensibilidade desse resultado em relação às prioridades atribuídas aos critérios essenciais, identificando a partir de qual valor o resultado final seria alterado. Outras análises, como a atribuição do mesmo julgamento a todos os critérios, definindo que todos têm igual importância, e a desconsideração dos sub-critérios também serão apresentados nas seções que seguem.

5.2.3.1. Sensibilidade às prioridades atribuídas aos critérios essenciais

Para avaliar a sensibilidade do resultado em relação às prioridades atribuídas aos critérios essenciais, foram utilizados os gráficos dinâmicos gerados pelo *software* Expert Choice 2000 (*Dynamic sensitivity-graph*), para identificar a prioridade inicialmente atribuída a cada um dos critérios essenciais e as faixas em que estas poderiam variar sem alterar o resultado final (considerando que, a partir do valor inicialmente atribuído, ao reduzir ou aumentar a prioridade de um critério, os demais critérios sofreriam um aumento ou redução proporcionais, respectivamente). Dessa forma, foram identificadas as faixas de variação apresentadas na tabela 100; é importante ressaltar que as prioridades atribuídas aos sub-critérios e os julgamentos efetuados para os *softwares* SS_1 e SS_2 foram mantidos constantes.

Ao analisar as faixas de prioridades, pôde-se observar que o resultado obtido é sensível aos critérios C_2 (importação de dados), C_3 (suporte às distribuições de probabilidades), C_6 (variáveis globais), C_{10} (exportação de dados) e C_{12} (manutenção de banco de dados), ou seja, aqueles em que o *software* SS_2 foi mais bem avaliado. Entretanto, pôde-se verificar que a prioridade inicialmente atribuída a estes critérios é significativamente inferior ao valor máximo identificado; assim, mesmo que a prioridade para qualquer um

destes critérios fosse aumentada em até 35% (considerando constantes os demais valores), o resultado atual ainda seria mantido.

Tabela 100. Faixas de variação na prioridade atribuída aos critérios essenciais que não alteram o resultado obtido.

Critério	Prioridade inicial (%)	Prioridade mínima (%)	Prioridade máxima (%)	Prioridade inicial + 35% (%)
C ₁	22,9	0,0	97,1	30,9
C ₂	4,1	0,0	8,8	5,5
C ₃	7,1	0,0	13,9	9,6
C ₄	1,9	0,0	100,0	2,6
C ₅	2,1	0,0	100,0	2,8
C ₆	12,5	0,0	16,9	16,9
C ₇	12,3	8,8	100,0	16,6
C ₈	1,3	0,0	100,0	1,8
C ₉	3,0	0,0	100,0	4,1
C ₁₀	5,0	0,0	12,1	6,8
C ₁₁	3,7	0,0	100,0	5,0
C ₁₂	9,1	0,0	12,5	12,3
C ₁₃	1,3	0,0	100,0	1,8
C ₁₄	13,6	8,8	100,0	18,4

5.2.3.2. Sensibilidade à atribuição da mesma prioridade para os critérios e sub-critérios

A seguir, foi atribuída a mesma prioridade para os critérios e sub-critérios essenciais, mantendo os julgamentos efetuados para os *softwares* SS₁ e SS₂. Para tanto, construiu-se uma nova matriz de comparação paritária para os critérios C₁ a C₁₄ (tabela 101) e para os sub-critérios dos critérios C₂ (tabela 102), C₈ (tabela 103) e C₁₀ (tabela 104), aos quais foi atribuído o valor 1 para todos os julgamentos, ou seja, definindo que os critérios possuem igual importância, segundo a escala de julgamentos apresentada anteriormente na tabela 31.

Tabela 101. Nova comparação paritária dos critérios essenciais (considerando-se que todos possuem a mesma importância).

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄
C ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₂	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₃	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₄	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₅	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₆	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₇	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
C ₈	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1
C ₉	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1
C ₁₀	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1
C ₁₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1
C ₁₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
C ₁₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
C ₁₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

$RC = 0,00$

Tabela 102. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C₂ (considerando-se que todos possuem a mesma importância).

	C _{2.1}	C _{2.2}
C _{2.1}	1	1
C _{2.2}	-	1

$RC = 0,00$

Tabela 103. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C₈ (considerando-se que todos possuem a mesma importância).

	C _{8.1}	C _{8.2}	C _{8.3}	C _{8.4}	C _{8.5}
C _{8.1}	1	1	1	1	1
C _{8.2}	-	1	1	1	1
C _{8.3}	-	-	1	1	1
C _{8.4}	-	-	-	1	1
C _{8.5}	-	-	-	-	1

$RC = 0,00$

Tabela 104. Nova comparação paritária dos sub-critérios do critérios essencial C_{10} (considerando-se que todos possuem a mesma importância).

	$C_{10.1}$	$C_{10.2}$	$C_{10.3}$
$C_{10.1}$	1	1	1
$C_{10.2}$	-	1	1
$C_{10.3}$	-	-	1
$RC = 0,00$			

As matrizes obtidas foram utilizadas para desenvolver outro modelo do método de análise hierárquica (AHP) no *software* Expert Choice 2000, sendo considerados os mesmos julgamentos efetuados para os *softwares* SS_1 e SS_2 apresentados na seção 5.2.2 (tabelas 94 a 99). As razões de consistências (RC) calculadas pelo Expert Choice 2000 foram iguais a zero, pois não existe inconsistência, dado que todos os critérios foram julgados com mesma importância entre si. Esse *software* calculou ainda o vetor de prioridades global, que indicou qual *software* de simulação de eventos discretos apresentou o melhor desempenho na avaliação comparativa da qualidade de suas características, considerando-se a mesma prioridade para todos os critérios, conforme segue:

- $SS_1 = 0,566$
- $SS_2 = 0,434$

O resultado obtido indicou que o *software* SS_1 seria selecionado para o desenvolvimento dos modelos voltados à análise de sistemas logísticos no contexto deste trabalho, pois sua pontuação foi significativamente superior à do *software* SS_2 (aproximadamente 30,5%), ou seja, a atribuição da mesma prioridade para os critérios e sub-critérios manteria o resultado obtido e aumentaria ainda mais a diferença na pontuação geral dos *softwares*, que inicialmente foi de apenas 5,8%.

5.2.3.3. Sensibilidade à desconsideração dos sub-critérios

Nesta análise, foram desconsideradas as matrizes de comparações paritárias construídas para os sub-critérios dos critérios essenciais C_2 , C_8 e C_{10} , mantendo somente a matriz elaborada para o conjunto de critérios essenciais e os julgamentos realizados para os *softwares* SS_1 e SS_2 . Conforme pode ser observado nas tabelas 105 a 108, foram adicionadas as matrizes de comparação paritária para os critérios C_2 , C_8 e C_{10} , mantendo a representação por meio de uma estrutura hierárquica, ou seja, com o objetivo do problema no primeiro nível, seguido pelos critérios essenciais e, por fim, pela lista de alternativas, com os *softwares* SS_1 e SS_2 .

Tabela 105. Comparação paritária dos *softwares* SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_1 (a), C_2 (b), C_3 (c) e C_4 (d).

<hr/>			<hr/>			<hr/>			<hr/>		
	SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂		SS ₁	SS ₂
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
SS ₁	1	1	SS ₁	1	1/3	SS ₁	1	1/2	SS ₁	1	5
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<hr/>			<hr/>			<hr/>			<hr/>		
<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>			<i>RC = 0,00</i>		
(a)			(b)			(c)			(d)		

Tabela 106. Comparação paritária dos *softwares* SS_1 e SS_2 em relação aos critérios C_5 (a), C_6 (b), C_7 (c) e C_8 (d).

<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>			<hr/> SS ₁ SS ₂ <hr/>		
SS ₁	1	3	SS ₁	1	1/3	SS ₁	1	5	SS ₁	1	3
SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1	SS ₂	-	1
<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>			<hr/> RC = 0,00 <hr/>		
(a)			(b)			(c)			(d)		

Tabela 107. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C₉ (a), C₁₀ (b) e C₁₁ (c).

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	7
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(a)		

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	1/3
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(b)		

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	5
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(c)		

Tabela 108. Comparação paritária dos *softwares* SS₁ e SS₂ em relação aos critérios C₁₂ (a), C₁₃ (b) e C₁₄ (c).

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	1/5
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(a)		

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	3
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(b)		

	SS ₁	SS ₂
SS ₁	1	3
SS ₂	-	1
$RC = 0,00$		
(c)		

As matrizes de comparação paritárias apresentadas nas tabelas 105 a 108 e a matriz para os critérios essenciais descrita na seção 5.2.2 (tabela 90) foram utilizadas para desenvolver um novo modelo do método de análise hierárquica (AHP) no *software* Expert Choice 2000. Esse *software* calculou as razões de consistência (RC) apresentadas e o vetor de prioridades global, que indicou qual *software* de simulação de eventos discretos apresentou o melhor desempenho na avaliação comparativa da qualidade de suas características, considerando somente os critérios essenciais, conforme segue:

- SS₁ = 0,513
- SS₂ = 0,487

Assim, o *software* SS₁ ainda seria selecionado para o desenvolvimento dos modelos voltados à análise de sistemas logísticos no contexto deste trabalho, pois sua pontuação foi

ligeiramente superior à do *software* SS₂ (aproximadamente 5,5%), mesmo com a desconsideração dos sub-critérios dos critérios essenciais C₂, C₈ e C₁₀.

5.3. Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a aplicação prática do método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados à análise de sistemas logísticos. Para tanto, foram avaliados três *softwares* extensivamente utilizados para ensino e pesquisa na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, identificados como SS₁, SS₂ e SS₃.

Assim, após a atribuição de pesos aos critérios e a identificação das principais características dos *softwares*, foi calculada a pontuação total obtida por cada um deles. O *software* SS₃ foi desclassificado por não atender a todos critérios essenciais; pôde-se observar que esse *software* possuía características limitadas, quando comparadas às dos *softwares* SS₁ e SS₂, devido ao fato de ser um suplemento (*add-in*) para a planilha eletrônica Microsoft Excel. Também foram constatadas a simplicidade e eficiência dessa fase, que rapidamente gerou subsídios para uma avaliação superficial dos *softwares* SS₁, SS₂ e SS₃, entretanto, precisa em relação ao conjunto de critérios suportado.

Os problemas testes propostos para o dimensionamento da tancagem de um porto e para o dimensionamento da frota de caminhões foram importantes na segunda fase do método, pois permitiram conduzir diversos experimentos e avaliar comparativamente o desempenho dos modelos desenvolvidos com os *softwares* de simulação SS₁ e SS₂, classificados na primeira etapa. Assim, a percepção adquirida foi utilizada para atribuir os julgamentos aos critérios e aos *softwares* nas matrizes de comparação paritárias elaboradas para o método de análise hierárquica (AHP), que possibilitou verificar se ocorreram inconsistências nos julgamentos atribuídos, por meio da razão de consistência (RC) calculada. O resultado obtido indicou que o *software* SS₁ deveria ser selecionado para o

desenvolvimento das aplicações em sistemas logísticos no contexto deste trabalho, ou seja, conforme os critérios definidos como essenciais no momento da atribuição de pesos realizado na primeira fase do método.

Foi verificado que o resultado final estava em sinergia com a classificação gerada na primeira etapa, em que o *software* SS₁ foi mais bem colocado por uma pequena diferença (13 pontos). Da mesma maneira, foi mantida a tendência identificada na avaliação dos critérios ligados ao desenvolvimento do modelo, principalmente, onde as melhores avaliações também foram atribuídas a este *software*.

Por fim, a análise de sensibilidade realizada possibilitou identificar quais critérios poderiam alterar o resultado final e qual *software* seria selecionado em dois diferentes cenários: no primeiro, atribuiu-se a mesma prioridade para todos os critérios; já no segundo, foram desconsiderados os sub-critérios. Assim, foi possível constatar que o *software* SS₁ ainda seria selecionado em qualquer um destes cenários, ratificando o resultado inicialmente obtido.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Foi possível observar que a aplicação da simulação em diversas áreas, tais como: manufatura, indústria automobilística, transportes, serviços, saúde, sistemas de comunicação e de computação e alocação de pessoal, despertou o interesse das empresas especializadas no desenvolvimento de *softwares*. Por isso, diversos *softwares* de simulação de eventos discretos foram disponibilizados no mercado (*softwares* de prateleira ou COTS), com diferentes características e custos.

A modelagem de um problema, sem a necessidade de hipóteses simplificadoras, comumente adotadas pelos métodos analíticos, e a possibilidade de visualizar seu comportamento e compará-lo ao desempenhado pelo sistema real, entre outras características, impulsionaram o uso desses *softwares* em inúmeros problemas ligados aos sistemas logísticos; entre eles, a análise de capacidades, a avaliação dos impactos das mudanças realizadas em processos, a alocação de recursos limitados, a experimentação de diferentes parâmetros nas operações, a validação de projetos etc.

Dessa forma, verificou-se a necessidade de um método que permitisse a avaliação e seleção dos *softwares* de simulação que suportassem o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos, dadas as significativas diferenças em suas características e custos de aquisição; entretanto, entre os trabalhos disponíveis na Literatura, não foi constatado nenhum estudo que orientasse a seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados especificamente à análise de sistemas logísticos, pois a maior parte deles enfatizava a escolha de *softwares* para aplicação em áreas genéricas. Já entre as normas publicadas para regulamentar o processo de aquisição de *softwares*, pôde-se observar que estas tratavam especialmente dos *softwares* de prateleira modificáveis (MOTS) ou por encomenda (FD), ou seja, possuíam enfoque nos aspectos relacionados ao monitoramento das atividades realizadas durante o processo de desenvolvimento.

Com o objetivo de preencher a lacuna identificada, foi proposto um conjunto de critérios, agrupados em categorias organizadas hierarquicamente para suportar modificações, dado o aspecto dinâmico da evolução da tecnologia e da atualização dos *softwares*. Entre os 111 critérios descritos, 19 foram incorporados para atender às necessidades específicas do desenvolvimento de modelos voltados à análise de sistemas logísticos. Esses critérios formaram a base do método proposto para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos, que procurou incorporar as melhores características dos trabalhos identificados na Literatura; assim, a sua primeira fase gerou uma lista com os *softwares* que suportaram os critérios definidos como essenciais por meio da aplicação de um método de atribuição de pesos e pontuação, cuja eficiência e simplicidade são amplamente reconhecidas; já a segunda fase, utilizou o método de análise hierárquica (AHP), recomendado para a tomada de decisão baseada em múltiplos critérios, por permitir a identificação e correção das inconsistências geradas pelo julgamento humano.

Dois problemas testes também foram propostos para o desenvolvimento de aplicações em sistemas logísticos e a condução de experimentos com os *softwares*. Esses problemas são simples, sob o ponto de vista do conhecimento necessário para sua modelagem e dos recursos que devem ser suportados pelos *softwares*; entretanto, possibilitaram explorar suas características gerais e conduzir diversos experimentos, permitindo avaliar comparativamente o desempenho dos *softwares* de simulação de eventos discretos.

Assim, os *softwares* Arena (SS₁), ProModel (SS₂) e @Risk (SS₃), extensivamente utilizados para ensino e pesquisa na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, foram avaliados durante a aplicação prática do método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação. Após a atribuição dos pesos aos critérios e a identificação das suas principais características, foi calculada a pontuação total obtida por cada um deles; somente o *software* @Risk foi desclassificado por não atender a todos os critérios essenciais. Foi possível notar

que esse *software* apresentou um resultado inferior aos demais por ser um suplemento (*add-in*) para a planilha eletrônica Microsoft Excel; dessa forma, critérios como variáveis globais (C_6), roteamento condicional (C_7), animação (C_8) e exportação de dados periódica ($C_{10.3}$), não foram atendidos. Cabe destacar, ainda, que nesta fase os *softwares* de simulação foram avaliados segundo 111 critérios; entretanto, devido à eficiência e simplicidade do método de atribuição de pesos e pontuação, essa etapa permitiu uma avaliação rápida e superficial, mas precisa das características dos *softwares* de simulação.

Já na segunda fase, os problemas testes propostos permitiram a condução de diversos experimentos e a avaliação comparativa do desempenho dos modelos desenvolvidos com os *softwares* Arena e ProModel, classificados na primeira etapa. Os resultados obtidos e a percepção adquirida sobre as características de cada um desses *softwares* foram vitais para os julgamentos realizados para a construção das matrizes de comparação paritárias do método de análise hierárquica (AHP); o apoio do *software* Expert Choice 2000 também foi importante, pois, após a definição destas matrizes, o mesmo já calculava as razões de consistências (indicando as inconsistências dos julgamentos) e o resultado final. O *software* Arena foi selecionado pelo método, com uma discreta vantagem de 5,8% sobre o *software* ProModel. Esse resultado manteve a tendência do resultado parcial obtido na primeira fase do método proposto e confirmou a percepção em relação ao tempo necessário para construção do modelo (C_{13}), mais bem avaliado para o *software* Arena.

A análise de sensibilidade realizada possibilitou avaliar o resultado em dois cenários diferentes: no primeiro, a mesma prioridade foi atribuída para todos os critérios (indicando dessa forma, qual foi o real desempenho dos *softwares*, dado que nenhum critério tinha preferência sobre os demais); já no segundo, foram julgados somente os critérios essenciais, desconsiderando-se a influência de seus sub-critérios. Em ambos os cenários, o *software* Arena ainda seria selecionado, com uma vantagem de 30,5% e 5,5%, respectivamente. A

tabela 109 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelo método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos.

Tabela 109. Resultados obtidos com a aplicação do método proposto.

Fase	Descrição do resultado	Arena	ProModel	@Risk
Primeira	Pontuação total obtida	248	235	166
	Número de critérios essenciais atendidos (foram definidos 14 no total)	14	14	10
	Classificado para segunda fase	sim	sim	não
Segunda	Pontuação total obtida	0,514	0,486	-
	Pontuação total obtida após atribuição da mesma prioridade para os critérios e sub-critérios (análise de sensibilidade)	0,566	0,434	-
	Pontuação total obtida após a desconsideração dos sub-critérios (análise de sensibilidade)	0,513	0,487	-
	<i>Software</i> selecionado	sim	não	-

É importante também destacar que foram identificadas, por meio da análise de sensibilidade, as faixas de variação nas prioridades atribuídas aos critérios essenciais que alteravam o resultado obtido; assim, pôde-se observar que este foi sensível à importação de dados (C_2), ao suporte às distribuições de probabilidades (C_3), às variáveis globais (C_6), à exportação de dados (C_{10}) e à manutenção de banco de dados (C_{12}). Entretanto, mesmo que as prioridades atuais fossem aumentadas em até 35% (um critério por vez e considerando os demais valores constantes), o resultado atual ainda seria mantido. Dessa forma, foi confirmado o resultado obtido, que indicou uma ligeira vantagem do *software* Arena sobre o ProModel.

Assim, os objetivos propostos foram atingidos com êxito e as seguintes contribuições ao meio acadêmico e ao mercado de sistemas logísticos podem ser destacadas:

- Identificação da inexistência de um método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados à resolução de problemas em sistemas logísticos;
- Definição de um conjunto com 111 critérios, entre os quais 19 são específicos para avaliação de *softwares* de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos;
- Proposta de um método para seleção de *softwares* de simulação composto por duas fases: a primeira utiliza um método de atribuição de pesos e pontuação; a segunda, o método de análise hierárquica (AHP); o procedimento proposto procurou incorporar as principais vantagens de cada um desses métodos;
- Descrição de dois problemas testes, representativos de casos típicos em sistemas logísticos e com aplicabilidade em diversos problemas reais, com o objetivo de possibilitar a exploração das características gerais e a condução de experimentos com os modelos para a avaliação comparativa do desempenho dos *softwares* de simulação de eventos discretos.

Por fim, ao longo da realização deste trabalho, alguns pontos se destacaram pelo seu potencial como tema de futuras pesquisas, mas não foram explorados pelo fato de não se enquadrarem diretamente nos objetivos propostos. Dentre eles:

- Incorporação de novos critérios para avaliação dos *softwares* de simulação. A organização hierárquica das categorias de critérios foi concebida para suportar modificações, dado o aspecto dinâmico da evolução tecnológica e da atualização dos *softwares*;
- Avaliação da NBR ISO/IEC 12119, aplicável aos *softwares* de prateleira (COTS). Essa norma estabelece os requisitos de qualidade e as instruções de como testar os

softwares, contemplando essencialmente a avaliação de sua descrição, documentação e a verificação da conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos. É interessante estudá-la como um complemento ao método proposto, pois esta pode auxiliar na seleção de um *software* que atenda tanto aos critérios definidos para a modelagem de aplicações em sistemas logísticos, quanto aos requisitos de qualidade definidos pela norma;

- Desenvolvimento de outros cenários para análise de sensibilidade, como, por exemplo, a avaliação do resultado, considerando-se somente os 5 critérios mais importantes; ou ainda, a atribuição de novos julgamentos durante a comparação dos *softwares* em relação a cada um dos critérios;
- Propostas de outros problemas testes que permitam avaliar critérios essenciais específicos para o desenvolvimento de aplicações nas sub-áreas de sistemas logísticos, tais como: operações complexas, cadeias de suprimentos, sistemas de distribuição e transportes, planejamento e controle de estoque e produção, transporte aéreo, rodo-ferroviário e marítimo, entre outras;
- Aplicação prática do método de avaliação e seleção de *softwares* de simulação, considerando-se outros *softwares*, dentre as diversas opções disponíveis no mercado.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, E. G.; MORRICE, D. J. **Capacity and Backlog Management in Queuing-Based Supply Chains**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1302-1305, 2002.
- AT RISK. **Guide to using @Risk**. 2005. New York: Palisade Corporation.
- BAIRD, S. P.; LEAVY, J. J. **Simulation modeling using ProModel for Windows**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 527-532, 1994.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. Porto Alegre: Bookman. 4 ed. 2001.
- BANKS, J. **Selecting Simulation Software**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 15-20, 1991.
- BANKS, J. **Simulation Languages and Simulators**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 88-96, 1992.
- BANKS, J. **Software for Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 24-33, 1993.
- BANKS, J. **Software for Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 32-38, 1995.
- BANKS, J. **Software for Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 31-38, 1996.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice**. New York: Wiley-Interscience Publishers, 1998.
- BANKS, J. **Introduction to Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 7-13, 1999.
- BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L. **Discrete-event System Simulation**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 2 ed. 1996.
- BARNARD, C. J.; VAN HAAFTEN, D. H. **Simulation Model for Shipment of Waste to the Waste Isolation Pilot Plant**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1101-1106, 2000.
- BAZARGAN, M.; FLEMING, K.; SUBRAMANIAN, P. **A Simulation Study to Investigate Runway Capacity Using TAAM**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1235-1243, 2002.
- BOESEL, J.; BODOH, D. **Simulating Airspace Redesign for Arrivals to Detroit-Wayne County Airport (DTW)**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1318-1325, 2004.

- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logistical Management: the integrated Supply Chain Process**. New York: Mcgraw-Hill. 1996.
- BURNETT, D.; LEBARON, T. **Efficiently Modeling Warehouse Systems**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1001-1006, 2001.
- CODESP. **TEAS consolida capacidade do porto para operação de granéis líquidos**. 25 de fevereiro de 2005. Disponível em: <http://www.portodesantos.com/releases/arquivo2/0116.html>. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- CSCMP. **Council of Supply Chain Management Professionals – Supply Chain Management and Logistics Management Definitions**. 2005. Disponível em: <http://www.cscmp.org/Website/AboutCSCMP/Definitions/Definitions.asp>. Acessado em: 29 de setembro de 2005.
- DAVIS, L.; WILLIAMS, G. **Evaluation and Selecting Simulation Software Using the Analytic Hierarchy Process**. *Integrated Manufacturing Systems* 5(1), pp. 23-32, 1994.
- DÍAZ, J. A.; PÉREZ, I. G. **Simulation and Optimization of Sugar Cane Transportation in Harvest Season**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1114-1117, 2000.
- ELLIOTT, M. **Buyer's Guide Simulation**. IIE Solutions, pp. 55-64. Maio, 2000.
- EXPERT CHOICE. **Quick Start Guide & Tutorials: User's Manual**. 2000. Pittsburgh: Expert choice, Inc.
- FELLMAN, L.; DEARMON, J. S.; CONNOLLY, K. A. **Estimating Efficacy of Progressive Planning for Air Traffic Flow Management**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1312-1317, 2004.
- FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário da Língua Portuguesa**. 2 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira. 1986.
- FOLHA DE SÃO PAULO. **Paranaguá criará caminho alternativo**. 08 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/dinheiro/fi0801200506.htm>. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- FRANZESE, L. A. G.; FIORONI, M. M.; BOTTER, R. C. **Railroad Simulator on Closed Loop**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1602-1606, 2003.
- FRANZESE, O.; JOSHI, S. **Traffic Simulation Application to Plan Real-Time Distribution Routes**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1214-1218, 2002.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Santa Catarina: Visual Books. 1 ed. 2001.

- GARCIA, E. S.; SILVA, C. F.; SALIBY, E. **A Simulation Model to Validate and Evaluate the Adequacy of an Analytical Expression for Proper Safety Stock Sizing.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1282-1288, 2002.
- GAZETA DO POVO. **Fila para o porto não acaba.** 08 de abril de 2004. Disponível em: <http://www.tudoparana.com/gazetadopovo/economia/conteudo.phtml?id=2065>. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- GIACAMAN, G. J.; MEDEL, R. P.; TABILO, J. A. **Simulation of the Material Transporting and Loading Process in Pedro de Valdivia Mine.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1349-1355, 2002.
- GUE, K. R.; KANG, K. **Staging Queues in Material Handling and Transportation Systems.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1104-1108, 2001.
- GUTTKUHN, R. et al. **A Discrete Event Simulation for the Crew Assignment Process in North American Freight Railroads.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1686-1692, 2003.
- HAFIZOGULLARI, S.; CHINNUSAMY, P.; TUNASAR, C. **Simulation Reduces Airline Misconnections: A Case Study.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1192-1198, 2002.
- HARRELL, C. R. et al. **System Improvement Using Simulation.** Orem, Utah: ProModel Corporation. 5 ed. 1997.
- HLUPIC, V.; MANN, A. S. **SimSelect: a System for Simulation Software Selection.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 720-727, 1995.
- HOMER, J. B.; KEANE, T. E.; LUKIANTSEVA, N. O.; BELL, D. W. **Evaluating Strategies to Improve Railroad Performance – a System Dynamics Approach.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1186-1193, 1999.
- HUGAN, J. C. **Using Simulation to Evaluate Site Traffic at an Automobile Truck Plant.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1013-1016, 2001.
- IEEE 1062. **IEEE Recommended Practice for Software Acquisition.** *Institute of Electrical and Electronics Engineers.* 1998.
- JAIN, S. **Supply Chain Management Tradeoffs Analysis.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1358-1364, 2004.
- JAIN, S.; CHOONG, N. F.; AYE, K. M.; LUO, M. **Virtual Factory: an Integrated Approach to Manufacturing Systems Modeling.** *International Journal of Operations and Production Management*, 21 (5/6), pp. 594-608, 2001.
- JAIN, S.; CHOONG, N. F.; LEE, W. **Modeling Computer Assembly Operations for Supply Chain Integration.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1165-1173, 2002.

- JAIN, S. et al. **Analyzing the Supply Chain for a Large Logistics Operation Using Simulation.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1123-1128, 2001a.
- JAIN, S. et al. **Development of a High-Level Supply Chain Simulation Model.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1129-1137, 2001b.
- JOUSTRA, P. E.; VAN DIJK, N. M. **Simulation of Check-In at Airports.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1023-1028, 2001.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena.** Boston: McGraw-Hill. 3 ed. 2004.
- KIRAN, A. S.; CETINKAYA, T.; OG, S. **Simulation Modeling and Analysis of New International Terminal.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1168-1172, 2000.
- KULICK, B. C.; SAWYER, J. T. **The Use of Simulation to Calculate the Labor Requirements in an Intermodal Rail Terminal.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1038-1041, 2001.
- KUO, S. S.; CHEN, E. J.; SELIKSON, P. L.; LEE, Y. M. **Modeling Continuous Flow with Discrete-Event Simulation.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1099-1103, 2001.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis.** Boston: McGraw-Hill. 3 ed. 2000.
- LINN, R. J.; CHEN, C. S.; LOZAN, J. A. **Development of Distributed Simulation Model for the Transporter Entity in a Supply Chain Process.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1319-1326, 2002.
- MACRO, J. G.; SALMI, R. E. **A Simulation Tool to Determine Warehouse Efficiencies and Storage Allocations.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1274-1281, 2002.
- MANE, A.; NAHAVANDI, S.; ZHANG, J. **Sequencing Production on an Assembly Line Using Goal Chasing and User-Defined Algorithm.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1269-1273, 2002.
- MARTINI MEAT. **Porto de Paranaguá inicia novas obras de infra-estrutura.** 04 de abril de 2005. Disponível em: <http://www.martinimeat.com.br/Noticias.asp?CdNoticia=34>. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- MERRICK, J. R. W.; VAN DORP, J. R.; MAZZUCHI, T. A.; HARRALD, J. R. **Modeling Risk in the Dynamic Environment of Maritime Transportation.** In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1090-1098, 2001.
- MORITA, H. **Revisão do Método de Análise Hierárquica – MAH (AHP – Analytic Hierarchy Process).** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1998.

- NBR ISO/IEC 12207. **Tecnologia da Informação – Processos de Ciclo de Vida do Software**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT. 1998.
- NBR ISO/IEC 12119. **Tecnologia de informação – Pacotes de software – Testes e requisitos de qualidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro: ABNT. 1998.
- NIKOUKARAN, J.; HLUPIC, V.; PAUL, R. J. **Criteria for Simulation Software Evaluation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 399-406, 1998.
- NOVAES, A. G. N. **Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos**. São Paulo: Edgard Blucher. 1989.
- ÖREN, T. I. **Future of Modeling and Simulation: Some Development Areas**. In: *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, 2002.
- ORMS Today. **Simulation Software Survey**. ORMS Today. Agosto, 2003.
- PALISADE CORPORATION. **@RISK – The World's Most Powerful Risk Analysis Tool**. 2006. Disponível em: <http://www.palisade.com/risk>. Acesso em: 01 de março de 2006.
- PARSONS, D. J.; SIPRELLE, A. J. **A Supply Chain Case Study of a Food Manufacturing Merger**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1090-1094, 2000.
- PROMODEL CORPORATION. **ProModel Optimization Software Suite**. 2006. Disponível em: <http://www.promodel.com/products/promodel>. Acesso em: 01 de março de 2006.
- ROCKWELL AUTOMATION. **Arena Forward Visibility for your Business**. 2006. Disponível em: http://www.arenasimulation.com/products/professional_edition.asp. Acesso em: 01 de março de 2006.
- ROSENBERGER, J. M. et al. **SimAir: a Stochastic Model of Airline Operations**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1118-1122, 2000.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. New York: McGraw-Hill. 1980.
- SCHULZE, T.; LEMESSI, M.; FILIPPI, F. **Simulation of a Night Taxi-Bus Service for the Historical Center of Rome**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1072-1078, 2001.
- SCHUNK, D.; PLOTT, B. **Using Simulation to Analyze Supply Chains**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1095-1100, 2000.
- SHANNON, R. E. **Introduction to Simulation**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 65-73, 1992.
- SOFTEX. **MPS.BR – Melhoria de Processo do Software Brasileiro: Guia de Aquisição**. Associação para Promoção da Excelência do Software Brasileiro. 2005.

- SPRINGSIM. **Spring Simulation Multiconference**. 2005. Disponível em: <http://www.scs.org/confernc/springsim/springsim05/springsim05.htm>. Acesso em: 05 de agosto de 2005.
- STANDRIDGE, C. R.; HELTNE, D. R. **An MSE-Based Simulation Capability for Strategic and Tactical Logistics**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1107-1113, 2000.
- SUMMERSIM. **Summer Simulation Multiconference**. 2005. Disponível em: <http://www.scs.org/confernc/summersim/summersim05/summersim05.htm>. Acesso em: 05 de agosto de 2005.
- TAKAKUWA, S.; TAKIZAWA, H.; ITO, K.; HIRAOKA, S. **Simulation and Analysis of Non-Automated Distribution Warehouses**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1177-1184, 2000.
- TEWOLDEBERHAN, T. W.; VERBRAECK, A.; VALENTIN, E.; BARDONNET, G. **An Evaluation and Selection Methodology for Discrete-Event Simulation Software**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 67-75, 2002.
- TRIBUNA DE SANTOS. **Caminhões causam 4 quilômetros de fila no Porto de Santos**. 27 de agosto de 2004. Disponível em: http://www.wilsonsons.com.br/agencia_maritima/jornal_noticia_2004_08_27b.asp. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- TRONE, J.; GUERIN, A.; CLAY, A. D. **Simulation of Waste Processing, Transportation, and Disposal Operations**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1085-1089, 2000.
- UNIVERSIA BRASIL. **Unipar investe R\$ 20,8 milhões**. 12 de dezembro de 2003. Disponível em: <http://www.universia.com.br/investnews/vernoticia.jsp?noticia=394999>. Acesso em: 24 de julho de 2005.
- VAN ASPEREN, E.; DEKKER, R.; POLMAN, M.; DE SWAAN ARONS, H. **Modeling Ship Arrivals in Ports**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1737-1744, 2003.
- VERBRAECK, A.; VALENTIN, E. **Simulation Building Blocks for Airport Terminal Modeling**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1199-1206, 2002.
- WESTERNSIM. **Western Simulation Multiconference**. 2005. Disponível em: <http://www.scs.org/confernc/westernsim/westernsim05/westernsim05.htm>. Acesso em: 05 de agosto de 2005.
- WSC. **Winter Simulation Conference**. 2005. Disponível em: <http://www.wintersim.org>. Acesso em: 04 de agosto de 2005.
- XU, J.; HANCOCK, K. L.; SOUTHWORTH, F. **Dynamic Freight Traffic Simulation Providing Real-Time Information**. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 1711-1719, 2003.