



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-9665-NTC/358

TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS.

Gilberto da Cunha Trivelato

RESUMO

Esta nota técnica apresenta uma introdução à modelagem e simulação de sistemas dinâmicos, com seus conceitos básicos e definições. São apresentados resumidamente:

1) uma introdução sobre modelagem e simulação, 2) modelos físicos usando similaridade, escalonamento e análise dimensional; 3) modelos matemáticos de sistemas conhecidos classificados pelos tipos: linear ou não linear; concentrado ou distribuído; estacionário (invariante no tempo) ou não estacionário (variante no tempo); determinístico ou aleatório; acionado por eventos ou pelo tempo; contínuo no tempo ou amostrado/discreto no tempo; e por formas de representação: equações, tabelas e gráficos; 4) modelos lógicos com álgebra booleana, tabelas, gráficos e máquinas de estado; 5) modelos computacionais; 6) modelos de sistemas existentes e desconhecidos; 7) formas de simulação tais como simulação física, simulação analógica ou simulação digital; 8) arquitetura HLA e os modelos de simulação militares incluindo simulação real (Live Simulation), Simulação Virtual (Virtual Simulation), Modelo ou Simulação Construtiva (Constructive Model or Simulation).

Palavras Chave: Modelos de Sistemas, Simulação Física, Simulação Analógica, Simulação Digital, arquitetura HLA.

ABSTRACT

This technical note presents an introduction to modeling and simulation of dynamic systems, with their basic concepts and definitions. It presents briefly: 1) an introduction to modeling and simulation; 2) physical models using similarity, scaling and dimensional analysis; 3) mathematical models of known systems classified by the types: linear or nonlinear; lumped or distributed; stationary (time invariant) or non stationary (time variant); deterministic or random; driven by events or by time; continuous in time or sampled/discrete in time; and by representation forms: equations, tables or graphics, 4) logical models with Boolean algebras, tables, graphics and state flows; 5) computational models; 6) model of real and unknown systems; 7) simulation methodology including physical simulation, analog simulation or digital simulation; 8) HLA architecture and military simulation models including live simulation, virtual simulation and constructive model or simulation.

Keywords: System Modeling, Physical Simulation, Analog Simulation, Digital Simulation, HLA architecture.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	4
<u>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</u>	5
<u>1</u> <u>INTRODUÇÃO</u>	6
<u>2</u> <u>MODELOS FÍSICOS</u>	6
<u>2.1</u> <u>Similaridade</u>	7
<u>2.2</u> <u>Escalonamento</u>	7
<u>2.3</u> <u>Análise Dimensional</u>	7
<u>3</u> <u>MODELOS MATEMÁTICOS – SISTEMAS CONHECIDOS</u>	8
<u>3.1</u> <u>Princípios de modelos matemáticos</u>	8
<u>3.1.1</u> <u>Linear ou não linear</u>	8
<u>3.1.2</u> <u>Concentrado ou distribuído</u>	9
<u>3.1.3</u> <u>Estacionário ou não estacionário</u>	10
<u>3.1.4</u> <u>Determinístico ou aleatório</u>	10
<u>3.1.5</u> <u>Contínuo ou amostrado</u>	10
<u>3.2</u> <u>Representação de modelos</u>	10
<u>3.2.1</u> <u>Equações</u>	10
<u>3.2.2</u> <u>Tabelas</u>	11
<u>3.2.3</u> <u>Gráficos</u>	11
<u>4</u> <u>MODELOS LÓGICOS</u>	12
<u>4.1</u> <u>Álgebra booleana</u>	12
<u>4.2</u> <u>Tabelas Lógicas</u>	12
<u>4.3</u> <u>Gráficos Lógicos</u>	12
<u>4.4</u> <u>Máquinas de Estado</u>	13
<u>5</u> <u>MODELOS DE SISTEMAS DISCRETOS</u>	13
<u>6</u> <u>MODELOS COMPUTACIONAIS</u>	13
<u>7</u> <u>MODELOS DE SISTEMAS EXISTENTES E DESCONHECIDOS</u>	14
<u>8</u> <u>FORMAS DE SIMULAÇÃO QUANTO AO MEIO</u>	15
<u>8.1</u> <u>Simulação Física</u>	15
<u>8.2</u> <u>Simulação Analógica</u>	15
<u>8.3</u> <u>Simulação Digital</u>	16
<u>9</u> <u>HLA E OS MODELOS DE SIMULAÇÃO MILITARES:</u>	16
<u>9.1</u> <u>Simulação Real (“Live Simulation”)</u>	16
<u>9.2</u> <u>Simulação Virtual (“Virtual Simulation”)</u>	17
<u>9.3</u> <u>Modelo ou Simulação Construtiva (“Constructive Model or Simulation”)</u>	17
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	18

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA 3-1 – Classificação de modelos matemáticos de sistemas</u>	9
<u>FIGURA 6-1 – Identificação de sistemas (Fonte: Johansson, 1993).</u>	14

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- DoD - Department of Defense of United States of America
- HLA - High Level Architecture
- NASA - National Administration Space Agency

1 INTRODUÇÃO

Modelagem, de forma geral, é a elaboração de um modelo para a representação de alguma coisa. **Modelo** é a representação de um sistema real ou imaginário usando uma linguagem, um meio, e segundo um posto de vista. O aspecto mais importante de um modelo é a relação **simplicidade versus fidelidade**. Um modelo é a representação do conhecimento e a principal ferramenta para o estudo do comportamento de sistemas complexos. Modelar é o primeiro passo para a análise de um sistema de qualquer natureza e sob qualquer aspecto. Quando o modelo é uma representação válida de um sistema, informações significativas podem ser retiradas sobre sua dinâmica ou seu desempenho.

Modelagem é um processo complexo e, em vários campos, envolve a capacidade de dedução e inferência. A modelagem de um sistema será mais fácil se: a) conhecermos as leis (físicas, etc.) pertinentes ao sistema, b) se for fácil obter uma representação gráfica ou simbólica do sistema, e, c) se as incertezas entre as entradas, parâmetros e saídas puderem ser quantificadas. Portanto podemos definir modelo como: “Uma representação física, matemática, lógica ou computacional qualquer de um sistema, processo, fenômeno ou entidade.” Segundo a sua natureza os modelos são classificados em: físicos, matemáticos, lógicos e, recentemente, computacionais.

Identificação é o método ou processo utilizado para se identificar os parâmetros utilizados nas relações físicas, matemáticas ou lógicas necessários para a elaboração do modelo; ou até estas relações..

O crescimento exponencial da capacidade de processamento dos computadores digitais e sua penetração em todas as áreas da vida humana permitiram uma verdadeira explosão no uso de modelos e da simulação. Sua importância pode ser verificada através da definição, tanto pela NASA como para o Departamento de Defesa Americano - DoD, da simulação como área estratégica para o futuro. Sem modelagem e identificação é praticamente impossível implementarmos simulações.

2 MODELOS FÍSICOS

Modelo “Físico”: “É um modelo em escala cujas características físicas representam as características físicas do sistema que está sendo modelado”.

2.1 Similaridade

Similaridade é a principal especificação a ser obedecida na implementação de um **modelo físico**. Consiste em obedecer a um escalonamento entre as grandezas e relações correspondentes ao criar e implementar uma representação física em correspondência biunívoca ao sistema real que se quer estudar. É utilizada principalmente onde se quer representar ambientes inacessíveis e projetos de grande porte, em particular nas áreas da engenharia civil, hidráulica ou mecânica.

2.2 Escalonamento

Devido a limitações físicas e até mesmo econômicas de blocos básicos, aplica-se o escalonamento para a implementação do modelo.

Escalaonamento é o processo de se reduzir os parâmetros de um modelo a partir da limitação de um outro parâmetro qualquer preservando ou não as mesmas relações entre eles no modelo elaborado. Se possível, o escalonamento efetuado deve manter tais relações. Se não, as mesmas podem até ser quebradas. Neste caso, deve-se verificar o correspondente impacto no fenômeno que se quer estudar.

Esta área é tratada e bastante estudada em desenvolvimento de aeronaves e grandes represas. O escalonamento pode ser efetuado seguindo **critérios geométricos, cinemáticos ou dinâmicos** entre as variáveis independentes.

2.3 Análise Dimensional

Antes da existência dos computadores, a utilização extensiva da simulação física através da similaridade estimulou o desenvolvimento da **análise dimensional** e suas aplicações por exemplo em mecânica dos fluidos. Esta estuda os grupos de parâmetros que influem no comportamento de um sistema e de seu modelo, e permite estudar o efeito da quebra das relações físicas no modelo sobre os fenômenos que se quer estudar.

3 MODELOS MATEMÁTICOS – SISTEMAS CONHECIDOS

Modelo Matemático: “É um modelo simbólico cujas propriedades são expressas em símbolos matemáticos e suas relações”.

3.1 Princípios de modelos matemáticos

Para o desenvolvimento de modelos matemáticos é importante analisar algumas propriedades fundamentais destes sistemas que têm consequências diferentes sobre o tipo de modelo. Neste sentido os modelos matemáticos podem ser basicamente classificados conforme a FIGURA 3-1.

3.1.1 Linear ou não linear

O primeiro aspecto é verificar se o sistema pode ser classificado como linear ou não linear. O **princípio da superposição** não pode ser aplicado quando o sistema não é linear. Nos sistemas lineares é mais fácil de se definir uma relação causal entre entrada e saída.

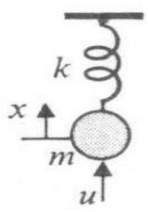
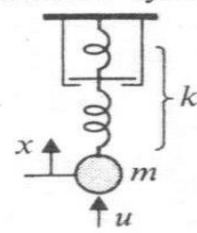
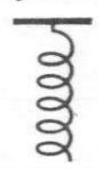
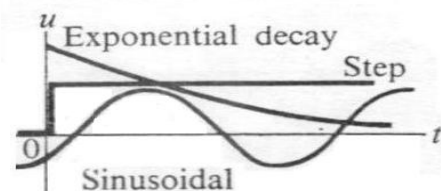
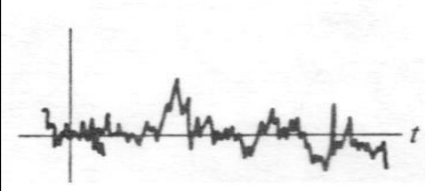
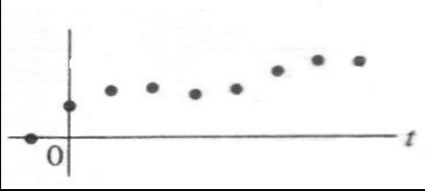
Linear system 	Nonlinear system 
Lumped-parameter system 	Distributed-parameter system 
Stationary system 	Nonstationary system 
Deterministic variable 	Random variable 
Continuous data 	Sampled data 

FIGURA 3-1 – Classificação de modelos matemáticos de sistemas
(Fonte: Takahashi et alli (1970)).

3.1.2 Concentrado ou distribuído

Um aspecto importante para a construção do modelo é verificar se os parâmetros do sistema podem ser considerados concentrados ou não. O processo de separar efeitos distribuídos/misturados no tempo ou no espaço ou considerar o sistema composto por

sistemas ideais é chamado concentração. No caso oposto o sistema é considerado distribuído e é mais adequado o uso de equações diferenciais parciais do que ordinárias para modelá-lo..

3.1.3 Estacionário ou não estacionário

Se os parâmetros de um sistema variam com o tempo (ex. massa de um foguete) o sistema é classificado como não estacionário ou variante no tempo; caso contrário ele é chamado estacionário ou invariante no tempo.

3.1.4 Determinístico ou aleatório

Se as variáveis são bem definidas a cada instante, por exemplo, com um degrau ou senóide o sistema é determinístico. Se o valor de cada variável é dado em uma base probabilística, o sistema é classificado como aleatório.

3.1.5 Contínuo ou amostrado

Usualmente as variáveis mudam continuamente no tempo e então o sistema é classificado como contínuo. Mas essas variáveis podem ser intermitentes ou amostradas e o sistema é considerado amostrado. As variáveis podem também apresentar qualquer valor ou podem variar por partes (quantizadas).

3.2 Representação de modelos

De acordo com a representação os modelos matemáticos podem ser classificados em:

3.2.1 Equações

As equações matemáticas que representam o modelo podem ser:

- Algébricas: quando as relações são representadas só por operações algébricas;
- Diferenciais: quando as relações são representadas por operações algébricas e diferenciais;
- Integrais: quando as relações são representadas por operações algébricas e integrais.

Essas equações ainda podem ser classificadas segundo os mesmos princípios utilizados para classificar os sistemas: lineares ou não lineares, equações ordinárias ou parciais (parâmetros concentrados ou distribuídos), de parâmetros variantes ou invariantes no tempo, determinísticas ou estocásticas, e contínuas ou discretas no tempo (a diferenças finitas).

3.2.2 Tabelas

Quando temos grandes dificuldades de extrair relações algébricas entre os dados que queremos modelar, o recurso da representação por tabelas matemáticas é importante. Isto é bastante verificado em sistemas não lineares com mais de duas dimensões. É uma técnica bastante utilizada para modelamento de motores e de desempenho de aeronaves.

3.2.3 Gráficos

Os recursos gráficos são muito importantes para a compreensão da estrutura dos sistemas e apresentam as categorias abaixo:

- Gráfico da função: mesmo conhecendo a função matemática que representa uma relação podemos substituí-la pela sua representação gráfica para maior facilidade de interpretação do usuário ou para economia de tempo de processamento quando implementamos este modelo em um computador.
- Diagramas de Blocos (“Block Diagrams”): é uma das formas que mais facilitam a compreensão de sistemas complexos. Quando são utilizadas a transformada S ou de Laplace, existem operações que nos permitem definir uma função de transferência total a partir das funções de transferências mais simples de blocos menores. Seu princípio básico é o fluxo de sinal. Sua representação pode ser estendida para fluxo de potência.
- Diagramas de Fluxo de Sinal (“Signal Flow Graphs”): Existe uma representação equivalente à efetuada por diagrama de blocos mas baseada no fluxo de sinais através do sistema. Também apresenta uma lógica para a composição das relações do sistema. É bem menos usado que a representação de diagrama de blocos porque é menos intuitiva e suas operações mais complexas.

- Diagramas de Ligação (“Bond graphs”): É uma representação de cada elemento baseada no fluxo de energia através do sistema. Permite o acoplamento dos elementos modelados pois o conceito de carga já é modelado intrinsecamente. Pode ser estendido para incluir fluxo de sinais.

4 MODELOS LÓGICOS

Modelo Lógico (Modelo de um Processo): “Modela um processo desenvolvido por um sistema”.

A álgebra lógica foi desenvolvida por Robert Boole no século XIX e é aplicada a circuitos comutadores. Ela provê uma ferramenta teórica para trabalharmos com variáveis que apresentam somente dois valores (0 ou 1). Suas três operações fundamentais são:

- Complemento ou negação (NOT);
- Soma lógica (OR);
- Produto lógico (AND).

4.1 Álgebra booleana

As relações entre as variáveis do sistema são representadas por equações lógicas ou booleanas.

4.2 Tabelas Lógicas

As relações entre as variáveis do sistema são representadas mapas de Karnaugh.

4.3 Gráficos Lógicos

As relações entre as variáveis do sistema são representadas por gráficos com portas lógicas representando as três operações fundamentais: NOR, OR e AND.

4.4 Máquinas de Estado

É a representação gráfica da dinâmica de um sistema lógico cujas variáveis apresentam um número finito de estados.

5 MODELOS DE SISTEMAS DISCRETOS

Sistemas Discretos baseados em eventos: São aqueles cujas variáveis de estado mudam somente em pontos específicos do tempo. Isso ocorre nos sistemas representados por modelos lógicos, entretanto é feita uma separação didática devida principalmente a: i) a área de simulação de sistemas discretos baseados em eventos é uma área do conhecimento ampla, definida, com toda uma bibliografia e nomenclatura próprias; ii) os sistemas contínuos complexos contêm inúmeras máquinas de estado em sua representação, como podem ser verificados nos modelos de aeronaves, foguetes, satélites, etc... Não é nosso propósito apresentar os conceitos desta área nesta nota técnica, mas apenas lembrar a sua importância e necessidade de um estudo específico à parte. Uma visão geral desta área da simulação é apresentada por Banks.

6 MODELOS COMPUTACIONAIS

Modelo Computacional: “É a tradução dos modelos matemáticos ou lógicos em/para a linguagem computacional”.

Como princípio fundamental todo modelo computacional é um modelo lógico, pois o fundamento de um computador digital é a lógica de comutação binária. As linguagens e tecnologias (software) disponíveis nos dias de hoje nos permitem uma tradução automática e praticamente transparente aos olhos dos usuários. Entretanto, em alguns casos, por exemplo quando utilizamos integradores numéricos, há diferenças entre o modelo matemático ou lógico e o modelo computacional, e estas diferenças podem tornar-se inaceitáveis. A não consideração destas diferenças pode acarretar erros graves de modelos com consequências danosas em projetos baseados no modelo em questão.

7 MODELOS DE SISTEMAS EXISTENTES E DESCONHECIDOS

Até agora tratamos da modelagem de sistemas cujo comportamento dinâmico ou lógico é conhecido. Quando o sistema é existente e não temos conhecimento de sua estrutura ou o conhecimento desta estrutura é muito limitado devemos usar técnicas de outra natureza, chamadas de **identificação**, aliadas à dedução e inferência.

Uma visão geral do problema de identificação é apresentada por Johansson (FIGURA 7-1).

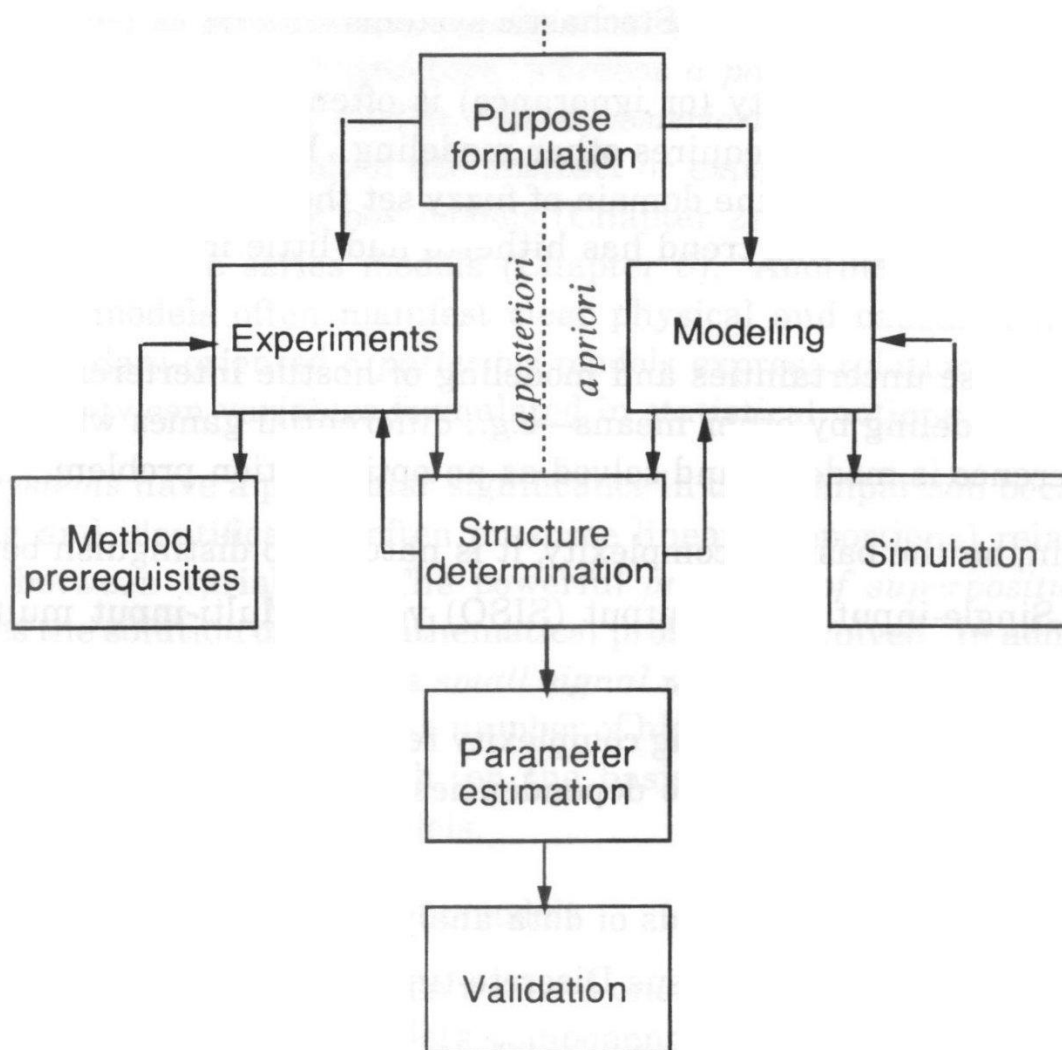


FIGURA 7-1 – Identificação de sistemas (Fonte: Johansson, 1993).

As relações entre as variáveis do sistema são representadas por equações integrais, diferenciais, algébricas, e até lógicas ou booleanas.

Técnicas de identificação mais comuns:

- Análise da resposta em frequência;
- Transformada de Fourier;
- Periodograma;
- Correlograma;
- Regressão linear;
- Filtros de Kalman;
- Redes Neurais;
- Identificação direta; etc.

8 FORMAS DE SIMULAÇÃO QUANTO AO MEIO

Quanto ao ambiente em que os modelos são implementados a simulação pode ser classificada como:

8.1 Simulação Física

É a construção de modelos físicos, escalonados ou não, para a representação de sistemas reais. Pode-se implementar todo sistema ou somente partes que representam os aspectos de interesse.

8.2 Simulação Analógica

Os modelos analógicos guardam relação de semelhança com partes ou com o todo do sistema modelado, mas são implementados em áreas distintas deste. A simulação analógica é a implementação destes modelos em meios analógicos.

Essa categoria de modelos é utilizada desde os primórdios da ciência. Com o advento dos computadores analógicos hidráulicos, pneumáticos e principalmente elétricos a implementação destes modelos nesses computadores passou a ser de importância

fundamental para o avanço da engenharia. Pode-se observar extraordinário avanço na área de Engenharia de Controle.

Os computadores analógicos são dispositivos pneumáticos, hidráulicos e eletrônicos compostos de blocos que implementam as funções básicas matemáticas. Um modelo matemático pode ser desmembrado nestas funções básicas e implementado nestes dispositivos.

A teoria nesta área é bastante desenvolvida e pode ser verificada em maiores detalhes em OGATA (1970) e SHEARER et alii (1967).

8.3 Simulação Digital

São os modelos matemáticos ou lógicos implementados em computador digital através de funções (relações) de são discretizadas no tempo. Também estão incluídos os modelos utilizando tabelas, curvas, banco de dados, etc.

A capacidade de implementação de modelos discretizados, incluindo tabelas e curvas, em computadores digitais ampliou a capacidade de modelamento de sistemas, principalmente os não lineares e variantes no tempo.

Um estudo mais elaborado pode ser efetuado em OGATA (1970) e FRANKLIN & POWELL et alii (1975).

9 HLA E OS MODELOS DE SIMULAÇÃO MILITARES:

De acordo com o “Defense Science Board” dos EUA, as simulações militares podem ser classificadas em 3 diferentes categorias:

9.1 Simulação Real (“Live Simulation”)

Envolve pessoas reais em sistemas reais. Testes operacionais e exercícios são exemplos.

9.2 Simulação Virtual (“Virtual Simulation”)

Envolve pessoas reais em sistemas simulados. Incluem-se nessa classificação os simuladores de aviões e de tanques. Esse tipo de simulação é muito utilizado para avaliação de controle, decisão e comunicação.

9.3 Modelo ou Simulação Construtiva (“Constructive Model or Simulation”)

Humanos podem ou não interagir com modelos, e tudo são simulados. São utilizadas pelo corpo de elite em treinamentos e análise de planos e estabelecimento de novas estratégias de ataque e preparação de missão.

9.4 ARQUITETURA HLA

A Arquitetura HLA é o mais recente paradigma de modelagem e simulação adotado pelo “Department of Defense – DoD” dos EUA, e suporta o desenvolvimento de simulação tanto virtual como construtiva. Tornou-se o padrão 1516 do IEEE em 2000. (ver IEEE P1516 (2000), IEEE P1516.1 (2000), IEEE P1516.2 (2000)) .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banks, J. (editor). **Handbook of Simulation**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 849 p.

Banks, J.; Carson II, J. S. **Discrete-Event System Simulation**. New Jersey: Prentice Hall, 1984. 514 p.

Franklin, G. F.; Powell, D. J.; Workman, M. L. **Digital Control of Dynamic Systems**. Portland: Book News Inc, 1985.

Fujimoto, R. M. **Parallel and Distributed Simulation Systems**. New York: John Wiley & Sons, 2000. 300 p.

Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). **IEEE P1516: Framework and Rules**. New Jersey: IEEE Press, 2000. 466 p.

Institute for Electrical and Electronic Engineers (IEEE). **IEEE P1516.1: Federation Interface Specification**. New Jersey: IEEE Press, 2000. 21 p.

Institute for Electrical and Electronic Engineers (IEEE). **IEEE P1516.2: Object Model Template (OMT) Specification**. New Jersey: IEEE Press, 2000. 129 p.

Johansson, R. **System Modeling and Identification**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 512 p.

Kuhl, F. K.; Weatherly, R. and Dahmann, J. **Creating Computer Simulation Systems**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2000. 212 p.

Linkens, D. A. (editor). **CAD for Control Systems**. New York: Marcel Dekker, 1993. 584 p.

Ogata, K. **System Dynamics**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 512 p.

Shearer, J.L.; Murphy, A. T., Richardson, H. H. **Introduction to System Dynamics**. Reading: Addison-Wesley Pub. Co., 1967.

Smetana, F. O. **Flight Vehicle Performance and Aerodynamic Control**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2001. 359 p.

Takahashi, Y.; Rabins, M. J.; Auslander, D. M. **Control and Dynamic Systems**. Reading: Addison-Wesley Pub. Co., 1970.

U. S. Defense Modeling and Simulation Office. **1993 DMSO Survey of Semi-Automated Forces**. Alexandria: DMSO, 1993.

U. S. Department of Defense. **Modeling and Simulation Glossary**. Washington: DOD, 1998.

White, F. M. **Fluid Mechanics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979. 701 p.

Zeigler, B. P. Praehofer, H. and Kim, T. G.; **Theory of Modeling and Simulation - Second Edition**. New York: Academic Press, 2000. 510 p.