

Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais

Guilherme Ernani Vieira (PUCPR) gui.vieira@pucpr.br

Resumo: *Apesar de ser uma área que há tempo vem sendo explorada por pesquisadores e indústria, simulação computacional ainda é uma técnica que não tem mostrado à sociedade toda sua potencialidade e benefícios que pode trazer àqueles que a utilizam eficientemente. Não se encontra com facilidade trabalhos que relatem as vantagens do seu uso. Este artigo revisa alguns dos conceitos básicos de simulação computacional, mas sua maior contribuição está no fato de rapidamente descrever aplicações práticas, relatadas na literatura - principalmente através da Internet, em processos industriais.*

Palavras-Chave: *Simulação computacional; Aplicações; Fundamentos.*

1 Tomada de decisão baseada em simulação

Como sistemas de informação podem auxiliar uma empresa a melhorar sua estrutura organizacional? Como indústrias podem definir melhores *layouts* produtivos ou o *mix* de produtos para nova temporada? Quais setores devem ser automatizados e quais equipamentos devem ser adquiridos? Como um novo sistema produtivo, ou a substituição de parte do sistema atual, irá afetar a produtividade da indústria e quão significativa será esta mudança? Como avaliar se a nova reestruturação produtiva trará os benefícios esperados? Será que o investimento gerará o retorno desejado? Simulação computacional é uma ferramenta, um sistema de informação e, por que não dizer também, de planejamento, que serve exatamente para responder estas questões. A grande novidade é que está facilmente disponível – falta apenas tornar-se conhecida e utilizada. Gerentes e diretores podem agora se beneficiar com o auxílio desta tecnologia, de fato, espera-se que em breve, os tomadores de decisão terão nos computadores de seus escritórios, ferramentas de simulação que rapidamente os auxiliem nas suas tarefas diárias.

Qualquer projeto de tamanho razoável em uma corporação de médio ou grande porte, que envolva recursos (pessoas, máquinas, carros, infra-estrutura, ferramentas, material) terá certamente a necessidade de investimento financeiro de valor considerável. É claro que se espera um retorno significativamente maior que o investimento feito e em tempo adequado, para que as alterações propostas sejam consideradas viáveis. Entretanto, normalmente defronta-se com a problemática de como comprovar que os benefícios serão maiores que os investimentos, e que, portanto, o projeto proposto deve receber a atenção devida. Felizmente hoje já existem ferramentas que permitem aos projetistas avaliar, ou quantificar, se de fato, as novas idéias trarão os benefícios imaginados. Essas ferramentas simulam o processo atual e o novo processo e a partir das comparações entre os dois cenários, pode-se inferir sobre a viabilidade ou não do novo projeto.

Isto é o que se chama de “*what...if analysis*” – que quer dizer, análise do “o que acontecerá se fizer isto ou aquilo”. É para isto que serve a simulação computacional, exatamente para auxiliar na tomada de decisão. É antever, prever, ou “olhar adiante”, para descobrir qual será o efeito que

determinadas ações trarão para o sistema sendo modificado. É descobrir se o investimento de 500.000 dólares numa nova máquina de corte a laser trará o aumento de produtividade que a empresa precisa, ou se o gasto com expansão do restaurante em mais 50 mesas trará benefícios, ou se a sinergia trazida por um *merger* com uma outra empresa da cadeia trará benefícios para proprietários, acionistas e sociedade, ou se a terceirização de alguns dos serviços da empresa trará economias para a corporação.

Mas, por natureza, toda previsão está errada (Chopra e Meindl, 2004), isto claro, se o sistema considerado for aleatório (estocástico ou não-determinístico), e isto significa dizer que as simulações também estarão sempre erradas. Como fazer então um planejamento e definir novas ações operacionais, táticas ou estratégicas, baseando-se em informações que por natureza estão erradas? Tudo depende de quão grande é o erro. Ou, falando inversamente, de quão precisos são os resultados. Em se trabalhando com uma confiança de 95% por exemplo, um aumento esperado na produtividade de $(15\pm 5)\%$ pode ser bem diferente de um aumento esperado de $(15\pm 0,5)\%$. Mesmo embora, na média, os valores sejam iguais, a precisão deste é muito maior do que daquele, e, portanto, a tomada de decisão baseada neste tem maiores chances de estar certa. Naquele, dez por cento de aumento pode não ser suficiente para se justificar o investimento a ser feito, por outro lado, um aumento de 20% seria fantástico. Um erro de $\pm 0,5\%$ é bem diferente de um erro de $\pm 20\%$. Sendo assim, a simulação, quando bem feita, permitirá que o tomador de decisão possa ter confiança na direção que está escolhendo, pois simulação permitirá a ele quantificar sua percepção e probabilidade de acerto (e de erro, conseqüentemente).

Este artigo descreve um pouco sobre os fundamentos desta tecnologia, que processos industriais pode-se aplicá-la, que benefícios têm sido relatados e, rapidamente, como se fazer um projeto de simulação.

2 Definições e características gerais

O conceito de simulação pode ser descrito como uma tentativa de replicar ou imitar formas do comportamento de um sistema, real ou sendo projetado, através da construção de um modelo matemático desenvolvido em um computador. Segundo Hollocks (1992), a simulação computacional é uma técnica de pesquisa operacional que envolve a criação de um programa computacional representando alguma parte do mundo real, de forma que experimentos no modelo original predizem o que acontecerá na realidade.

Para surpresa de muitos, simulação não é uma tecnologia tão recente. Schriber, na década de setenta (Schriber, 1974), já dizia que simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Também Shannon, na mesma década (Shannon, 1975), afirmou que simulação é quase sinônimo de simulação computacional digital, na qual um modelo computacional é executado. Para ele, a simulação computacional pode ser definida como um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa.

Vindo agora para um passado mais recente, para Pedgen *et al.* (1990), simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

A simulação procura modelar um sistema ou processo, dando apoio à tomada de decisão, possibilitando a redução de riscos e custos envolvidos em um processo. Cada vez mais, a simulação está sendo aceita e fazendo parte do dia a dia dos analistas, sendo vista como uma técnica/ferramenta para verificar e encaminhar soluções aos problemas encontrados nos mais diversos segmentos industriais.

Cada vez mais a simulação está sendo empregada nas indústrias (casos de sucesso são descritos na próxima seção) sob variados objetivos; como por exemplo:

- Reduzir custos de estoques, dimensionando-os corretamente de acordo com o planejamento da produção;
- Aumentar a *performance* de processos já existentes;
- Garantir que novos processos sejam testados e aprovados antes de suas implementações;
- Alcançar o mais alto nível de otimização de recursos e de pessoal;
- Obter os melhores resultados de logística com sua cadeia de fornecedores;
- Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação (Pedgen *et al.*, 1990);
- Estudos sobre a utilização da capacidade instalada, níveis de inventários, lógica de controle, refinamento de projeto, integração, sequenciamento, gargalos do sistema, melhor arranjo físico e melhor índice de produtividade dos funcionários (Lobão e Porto, 1996).

2.1 Vantagens e desvantagens da simulação

A simulação traz inúmeras vantagens se comparadas as de outros métodos analíticos ou experimentais, ou mesmo, baseados puramente na experiência do projetista ou tomadas de decisão. Dentre elas, pode-se citar, por exemplo:

- Uma vez o modelo de simulação criado, pode se fazer várias alterações ou modificações para avaliar projetos e políticas propostas;
- Permite a análise de longos períodos em um curto espaço de tempo (tempo de execução);
- O desenvolvimento do modelo de simulação ajuda a organização a separar os parâmetros controláveis daqueles que não são controláveis e estudar a influência de cada um deles sobre os sistemas;
- Hipóteses sobre como ou por quê certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação (Pedgen *et al.*, 1990);
- Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera (Banks e Carsen, 1984);
- Permite a análise de sensibilidade do tipo *what-if* (o que acontece se...). Várias políticas de decisão podem ser testadas e comparadas rapidamente (Corrêa *et al.*, 2001);
- Em suma, para aqueles problemas que na prática são resolvidos por regras intuitivas (*rules of the thumb*), a simulação é uma ferramenta forte para apoio a decisão permitindo que soluções potencialmente boas sejam encontradas (Corrêa *et al.*, 2001).

Como todas as técnicas, a simulação também possui algumas desvantagens. Entre elas pode-se citar:

- Um bom modelo de simulação pode se tornar caro e levar vários meses para o seu desenvolvimento, especialmente quando os dados são de difícil obtenção;

- A simulação não gera bons resultados sem *inputs* adequados. A construção e a alimentação do modelo requerem um trabalho árduo e criterioso (Corrêa *et al.*, 2001);
- Os resultados da simulação são, algumas vezes, de difícil interpretação. Uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade dos sistemas, é comum que existam dificuldades em determinar quando uma observação realizada durante uma execução se deve a alguma relação significativa no sistema ou a processos aleatórios construídos e embutidos no modelo (Pedgen *et al.*, 1990);
- A construção do modelo requer treinamento especial. O aprendizado se dá ao longo do tempo, com a aquisição de experiência (Banks e Carsen, 1984).

2.2 Ambientes de simulação

Existem duas abordagens principais de simulação computacional, a contínua e a discreta. Aquela é baseada em modelos representados por equações diferenciais e/ou a diferenças e representam bem processos contínuos ou de fluxo. Conseguem uma boa precisão na representação do sistema real, desde que o mesmo não seja extremamente complexo. A outra abordagem é a simulação discreta, dirigida por eventos, e baseada em uma tabela de eventos. Usa funções probabilísticas e consegue modelar sistemas mais complexos. Sua dinâmica ocorre por meio de uma seqüência de eventos separados (discretos) no tempo. Atualmente, existem inúmeros softwares para ambas as categorias de simulação, mas a discreta parece ser a mais difundida e utilizada.

Dentre as inúmeras maneiras de se simular sistemas, deve-se considerar fortemente os recursos, há muito tempo utilizados, como a Teoria das Filas (Prado, 1999), desenvolvida por A. K. Erlang no início do século XX, que alcançou grande sucesso, apesar da grande complexidade matemática. Pode-se utilizar também planilhas do MS Excel e o @RISC da *Palisade Corporation*. No âmbito da simulação, o uso de *softwares* é um ponto crucial. Pode-se dizer inclusive que simulação é sinônimo de simulação computacional.

No passado havia poucas alternativas, em termos de linguagem de programação, como FORTRAM, Pascal, também eram poucas as alternativas em linguagens específicas para simulação, entre elas, pode-se citar: GPSS, SIMULA, GASP e SLAM. Atualmente, face às inúmeras opções, a dificuldade na escolha de softwares reside no custo. Dentre as opções disponíveis pode-se citar: ARENA (*Rockwell software Automation Inc.*), AutoMod (*Autosimulations*), Extend (*Imagine That*), GPSS H (*Wolverine*), Micro Saint (*Micro Analysis & Design*), ProModel (*ProModel Corporation*), SIMPLE++ (AESOP), Simgist II.5 e MODSIM III (*CACI Products Company*), TAYLOR Iib, VisSim (*Visual Solutions*), dentre outros.

2.3 Áreas de aplicação da simulação

A utilização da simulação pode ser verificada em vários segmentos. Alguns setores onde a simulação é aplicada estão demonstrado na figura a seguir.

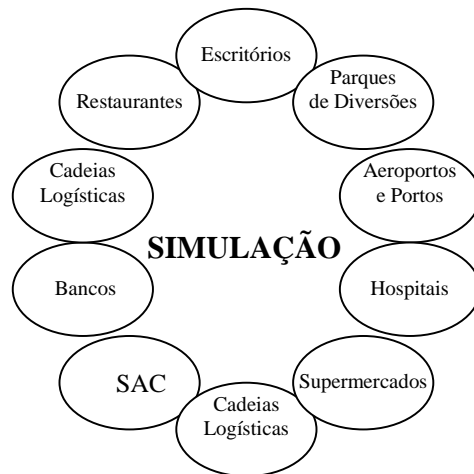


Figura 1 – Áreas de aplicação da simulação

Especificamente no Brasil, aplicações de simulação têm ocorrido em inúmeras áreas, como mencionado a seguir (PARAGON, 2006):

Logística & Supply Chain

- Estudo de expansão do Canal do Panamá;
- Dimensionamento de frotas de abastecimentos;
- Estudo de abastecimento de matéria prima;
- Estudo da logística de manutenção;
- Estudo da logística de carga/descarga de produtos;
- Dimensionamento da frota de transporte terceirizada;
- Dimensionamento de *supply-chain*;
- Distribuição de bebidas em escala nacional;
- Comparativo entre operadores logísticos;
- Movimentação e esvaziamento de pátio de veículos;
- Avaliação de sistema de armazenagem automatizado;
- Distribuição de produto alimentício perecível;

Ferrovias

- Malha ferroviária ligando São Paulo, Minas e Rio de Janeiro;
- Pátio ferroviário do porto de Tubarão;
- Estrada de ferro Vitória-Minas;
- Malha ferroviária da região sul do Brasil;
- Definição da melhor composição para transporte ferroviário urbano;

Siderurgia

- Armazenagem e transporte de matérias primas por sistema de correias em siderúrgica;
- Laboratório de análise de amostras da Aciaria;

- Forjaria de cilindros;
- Aciaria e expansões da Aciaria;
- Modernização da linha de fabricação de fios;
- Expansão da coqueria;
- Implantação de novo forno magnesiano;
- Fabricação de telas de aço;
- Estudo de movimentação para expansão de aciaria;
- Dimensionamento da frota de transporte interno;

Manufatura

- Dimensionamento do abastecimento em linha de montagem automotiva;
- Avaliação de mudanças em linha de montagem de motores;
- Estudo de alternativas para linha de montagem;
- Análise de impacto do *mix* produtivo;
- Dimensionamento de mão de obra em célula de pintura;
- Linha de pintura de chassis;
- Operadores trabalhando em célula;
- Estudo de simultaneidade em linha de vulcanização de pneus;
- Implantação de linha de montagem de eixos semi-automática;
- Estudo de desempenho de linha de produtiva;
- Simulação completa de nova fábrica automotiva;
- Estudo de investimento em maquinário;
- Dimensionamento da frota de empilhadeiras;
- Estudo do impacto de tempos de *setup* em linha de usinagem;
- Análise e balanceamento entre setores produtivos;
- Comparação entre diferentes *layouts* de montagem;
- Identificação do *mix* ótimo para célula de termoformagem;
- Estudo de dimensionamento de equipamentos;
- Dimensionamento de linha de montagem;
- Balanceamento macro entre setores fabris;
- Estudo de investimento em linha de montagem robotizada;
- Dimensionamento de mão de obra em células de produção;
- Comparação entre diferentes conceitos de produção e *layouts* de montagem;
- Melhoria da estampa;

Petróleo

- Simulador de cronograma de exploração de campo;
- Estudo de risco no cronograma de desenvolvimento e exploração de campo petrolífero marítimo;
- Dimensionamento de frota de rebocadores;

Celulose

- Logística de acesso rodoviário;
- Sistema logístico de suprimento de madeira para a indústria de celulose;

- Logística aquaviária;
- Dimensionamento portuário;
- Operações entre modais marítimo e ferroviário.

3 Alguns casos de sucesso

O que empresas como a Toyota, Motorola, Exxon Mobil, The Gillette Company, Caterpillar, Siemens, FIAT, 3M, Intel, Honeywell, FedEx, Ford, American Express, United Technologies, Kraft, Volkswagen, DaimlerChrysler, ups, Delta, General Motors, Hewlett Packard, General Electric e Cymer têm em comum? Muitas coisas, mas o que realmente interessa aqui é que todas elas têm utilizado (ou utilizaram) simulação computacional para melhorar seus processos, produtos e/ou serviços. Alguns casos de sucesso, mencionados no site do sistema ProModel (PROMODEL, 2006), são descritos a seguir.

A Exxon Mobil avaliou a instalação de novos equipamentos e mudanças nos processos para a divisão de Filmes para determinar o impacto no resto das suas operações. Através da simulação, inúmeras restrições envolvendo AGV's (*automated guided vehicles*) foram identificadas. Uma vez que o equipamento foi comprado e o processo alterado, a planta foi capaz de produzir 40% acima das expectativas. Milhões de dólares em benefícios foram obtidos.

Através da simulação, recomendações foram feitas à GM as quais economizaram milhões de dólares. Por exemplo, uma restrição inesperada teria causado uma perda de 30%.

Carrier Corporation usou simulação para modelar sua linha de pintura de equipamentos de refrigeração. Eles provaram que se um novo forno de pintura fosse instalado, isto melhoraria a produtividade, trazendo um benefício anual de \$370K, resultando à Carrier uma economia de mais de \$1 milhão.

Modelando toda a planta laser ajudou a Cymer aumentar sua produção em 400% em um ano, o que gerou um aumento de receita de \$180 milhões. Simulação foi usada para otimizar o projeto do novo layout, avaliar mudanças nos processos, programar pessoal, controlar WIP (*work-in-progress* ou estoque em processo) e investigar o impacto de novas técnicas.

Na FIAT, simulação permitiu a eles modelar seus processos com precisão, reduzindo o WIP em 48%, *lead times* e a necessidade de espaço físicos. Simulação permitiu a eles identificar mudanças específicas na programação e melhoramentos nos processos, resultando em grande ROI (*return on investment*) e mais do que um milhão de dólares em economia.

ProModel precisamente modelou o complexo processo de produção de bacon da Wright, ajudando-os a melhor selecionar novos equipamentos, e a fazer mudanças nos processos e nas programações de funcionários. Esta solução permitiu a Wright Brand Foods dobrar sua capacidade produtiva e economizar mais do que \$10 milhões.

Eastman Chemicals usa simulação para continuamente analisar e avaliar oportunidades de melhoria, para determinar se novas idéias serão válidas antes de se tomar o risco de implementação. Quantidade incontável de dólares tem sido economizada através de melhores

tempos de ciclo, avaliação de novos equipamentos, melhoramento na produtividade, projetos otimizados de pessoal e de manuseio de materiais.

A Boeing usou simulação para implementar com sucesso manufatura enxuta e reduzir consideravelmente custos produtivos. WIP, por exemplo, foi reduzido em 33%.

Nos últimos 10 anos, simulação tem ajudado a DuPont a economizar milhões de dólares. Uma das aplicações levou apenas duas semanas para ser implementada e economizou \$500,000.

Volkswagen economizou mais do que US\$ 20 milhões por ano com uma solução customizada para sua logística de distribuição (planta-centro de distribuição-revendedor). Melhoramentos incluíram mudança da localização de centros de distribuição e substituição de caras rotas de caminhões por rotas mais baratas (marítimas ou de trem).

Simulação tem sido usada para modelar e melhorar a complexa cadeia de fornecimento entre a planta da Thiokol (oeste dos Estados Unidos) e Cape Kennedy (Flórida). Economias de logística ficam na ordem de mais de um milhão de dólares.

Delta utilizou ProModel para avaliar novos equipamentos para transportar aviões. Uma solução ótima permitiu a Delta economizar milhões de dólares.

4 Metodologia de projetos de simulação

Segundo Banks e Carsen (1984), Pedgen *et al.* (1990), e Law e Kelton (1991), para se fazer simulação é necessário seguir alguns passos – uma metodologia de projeto de simulação. Estes passos podem ser resumidos como:

1. Formulação e análise do problema;
2. Planejamento do projeto;
3. Formulação do modelo conceitual;
4. Coleta de dados e informações;
5. Construção do modelo;
6. Verificação e validação;
7. Projeto do experimento;
8. Executar o experimento e analisar os resultados;
9. Refinar o projeto do experimento;
10. Análise final dos resultados e documentação do processo.

Dentre esses passos, algumas questões são particularmente importantes: Definição dos indicadores de desempenho, definição do nível de confiança, definição do número de replicações a ser utilizado, definição do tamanho (duração ou período) de análise, e se haverá ou não um período de aquecimento (transitório).

O nível de confiança (α) é usado principalmente para cálculo do intervalo de confiança para medida de desempenho adotada. Todas as comparações de desempenho entre os cenários considerados devem ser feitas com base nos intervalos de confiança dos indicadores de desempenho.

Os resultados a serem obtidos dependem diretamente do tamanho da replicação e do número destas. Existem algumas técnicas para se estimar o número de réplicas. A usada pelo autor baseia-se no método proposto por Kelton *et al.* (2002). Nesta, inicialmente faz-se uma experimentação (do cenário inicial) com n_0 réplicas. Com isto obtém-se um semi-intervalo de confiança para o indicador de desempenho escolhido h_0 . Executando-se o mesmo experimento para um número maior de replicações (n_1), o novo semi-intervalo de confiança será h_1 . Calcula-se então n^* como:

$$n^* \cong n_0 \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^2$$

Se n^* for maior do que n_1 , tem-se que repetir o processo (isto é, aumentar n_1) até que $n^* \leq n_1$.

5 Comentários finais

A simulação é indiscutivelmente uma grande aliada no processo de tomada de decisões. A flexibilidade permitida na análise de diferentes cenários, ou configurações de um modelo, trás inúmeras vantagens no uso desta tecnologia. Vários pontos de vista podem ser abordados, ganhando-se com isto uma melhor orientação dos investimentos rumo ao diferencial competitivo desejado.

Mas ainda se está no começo do uso dessa ferramenta, entretanto, os resultados já apontam para um crescimento forte na utilização desta técnica. O artigo mostrou que já inúmeras corporações têm usado simulação e que os segmentos de mercado, isto é, os ramos onde se podem aplicá-la são vastos. Os retornos de um projeto de simulação são enormes, os investimentos, entretanto, não são tão grandes.

Apesar da grande eficiência e “*user-friendliness*” dos sistemas de simulação disponíveis no mercado, para alcance de um bom resultado é necessário seguir uma metodologia na execução de projetos de simulação. É preciso garantir a consistência do modelo. É preciso validar o modelo inicial. Outro passo importante é o tratamento dos dados. Um estudo detalhado do sistema revela quais variáveis são realmente relevantes no processo. A escolha de um tipo de distribuição de frequência, para inserção dos dados, também contribuirá fortemente para a qualidade dos resultados.

Simulação é uma ferramenta quantitativa, entretanto, não é preciso ser um matemático para poder utilizá-la. Pelo contrário, os novos sistemas estão vindo com interfaces gráficas extremamente amigáveis, e com visualizações 3D que empolgam e vislumbram aqueles que estão utilizando-a. A tendência é que em breve, os tomadores de decisão terão em seus notebooks e computadores de escritórios algum tipo de ferramenta de simulação que lhes auxilia diariamente nas suas decisões.

6 Referências

BANKS, J. and CARSEN, J. S., *Discret Event System Simulation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.

CHOPRA, S., e MEINDL, P. *Supply Chain Management*. 2nd Edition. Prentice-Hall, 2004.

CORRÊA, H. L., GIANESI, I. G. N., CAON, M., Planejamento, Programação e Controle da Produção MRP II/ERP: Conceitos, Uso e Implantação, Editora Atlas, 4ª Edição, 2001.

HOLLOCKS, B. A well-kept secret: Simulation in manufacturing industry review. OR Insight 5(4) 12-17. 1992.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A.; *Simulation With Arena*; International Edition; 2nd Edition - New York; McGraw-Hill Companies; 2002.

LAW, A.M. e KELTON, W.D., *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill, NY, 1991.

LOBÃO, E. C.; PORTO, A. J. V.; Proposta Para Sistematização de Estudo de Simulação; Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP; São Paulo; 1996.

PARAGON, <http://www.paragon.com.br> – Consulta feita em Janeiro 2006.

PEGDEN, C.D., SHANON, R.E., SADOWSKY R. *Introduction to Simulation Using SIMAN*, McGraw-Hill New Jersey, 1990.

PRADO, D. S.; Usando o Arena em Simulação; Belo Horizonte – MG; Editora de Desenvolvimento Gerencial; 1999.

PROMODEL, <http://www.promodel.com> – Consulta feita em Janeiro 2006.

SCHRIBER, T.J., *Simulation Using GPSS*, Wiley, NY, 1974.

SHANNON, R. E., *Systems Simulation: The Art Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975.