

:Fundamentos de Simulação

AMOSTRA

AMOSTRA

Adriano Maniçoba da Silva

Autor de *Pesquisa operacional aplicada à logística*

3 Fundamentos de Simulação

Aplicações em **planilha
eletrônica, Python e R**

**PLANEJAR,
EXECUTAR e
COMPLETAR**

um bom estudo
com simulação
requer mais do que
boas habilidades
em programação.



ALTA BOOKS
GRUPO EDITORIAL
Rio de Janeiro, 2025

Fundamentos de Simulação

Copyright © 2025 STARLIN ALTA EDITORA E CONSULTORIA LTDA.

Alta Books é uma empresa do Grupo Editorial Alta Books (Starlin Alta Editora e Consultoria LTDA.).

Copyright © 2025 Adriano Maniçoba da Silva.

ISBN:978-85-508-2620-2

Impresso no Brasil – 1ª Edição, 2025 – Edição revisada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 2009.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(BENITEZ Catalogação Ass. Editorial, MS, Brasil)

S586f
1.ed. Silva, Adriano Maniçoba da
Fundamentos de simulação : aplicações em
planilha eletrônica, Python e R / Adriano
Maniçoba da Silva. - 1.ed. - Rio de Janeiro :
Alta Books, 2025.
384 p. : 15,7 x 23 cm.
ISBN 978-85-508-2620-2
1. Ciência da computação. 2. Dados - Análise.
3. Planilhas eletrônicas. 4. Python (Linguagem de
programação para computadores). 5. Simulação
computacional. I. Título.

03-2025/217

CDD 006

Índice para catálogo sistemático:

1. Simulação computacional : Planilhas eletrônicas :
Ciência da computação 006

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Todos os direitos estão reservados e protegidos por Lei. Nenhuma parte deste livro, sem autorização prévia por escrito da editora, poderá ser reproduzida ou transmitida. A violação dos Direitos Autorais é crime estabelecido na Lei nº 9.610/98 e com punição de acordo com o artigo 184 do Código Penal.

O conteúdo desta obra fora formulado exclusivamente pelo(s) autor(es).

Marcas Registradas: Todos os termos mencionados e reconhecidos como Marca Registrada e/ou Comercial são de responsabilidade de seus proprietários. A editora informa não estar associada a nenhum produto e/ou fornecedor apresentado no livro.

Material de apoio e erratas: Se parte integrante da obra e/ou por real necessidade, no site da editora o leitor encontrará os materiais de apoio (download), errata e/ou quaisquer outros conteúdos aplicáveis a obra. Acesse o site www.altabooks.com.br e procure pelo título do livro desejado para ter acesso ao conteúdo.

Suporte Técnico: A obra é comercializada na forma em que está, sem direito a suporte técnico ou orientação pessoal/exclusiva ao leitor.

A editora não se responsabiliza pela manutenção, atualização e idioma dos sites, programas, materiais complementares ou similares referidos pelos autores nesta obra.

Grupo Editorial Alta Books

Produção Editorial: Grupo Editorial Alta Books

Diretor Editorial: Anderson Vieira

Editor da Obra: Rosana Arruda

Vendas Governamentais: Cristiane Mutüs

Gerência Comercial: Claudio Lima

Produtora Editorial: Ana Clara Tambasco

Revisão: Camila Maia e Leandro Menegaz

Diagramação: Rita Motta

Capa: Rita Motta

AMOSTRA

Para Rafaela, Luiz Miguel e Maria Alice.

Agradecimentos

Meus agradecimentos ao Prof. Fernando Gonzales Tavares (*in memoriam*), caro amigo que prefaciou esta obra e nos deixou saudosos de paixão pela estatística e pela matemática. Agradeço também ao Grupo Editorial Alta Books, principalmente, a Rosana Silva — Editora de Aquisições da Alta —, que acreditou na proposta deste livro.

(...)

See the blind man

Shooting at the world

Bullets flying

Taking toll

(...)

You'd better close your eyes

Oh

Bow your head

Wait for the ricochet

(...)

Deep Purple – *Child in Time*

Prefácio

Neste livro, o autor Prof. Adriano Maniçoba da Silva, que já demonstrou, em outros trabalhos, suas habilidades para abordar temas relevantes na área de Administração — com ênfase em Logística, Produção e Operações, Programação linear (PL) e Simulação —, agora nos traz um tema que, além de pertinente, é oportuno. O livro destina-se a cursos superiores da área de Administração, escolas de Engenharia e profissionais que atuam nas áreas de gestão em várias especialidades.

Problemas de simulação podem ser analisados por meio de experimentos reais ou representados por modelos que atendem algum interesse particular. Possuem uma natureza dinâmica, que usam variáveis aleatórias e são formados por entidades que interagem entre si de forma lógica para algum fim.

O livro aborda tópicos de diferentes áreas e métodos, com o objetivo de trazer referências importantes para o aprofundamento do tema “Simulação”. Desse modo, a obra propõe ao leitor avançar, de maneira independente, para áreas mais específicas dos cursos de graduação e pós-graduação, com abordagem em simulação computacional. Apresentado em dez capítulos, seu conteúdo utiliza um texto claro e objetivo em que, por meio de problemas resolvidos e propostos de interesse tanto teórico como prático, apresenta diferentes técnicas de aplicação de simulação computacional.

No decorrer de cada capítulo, o leitor encontrará atividades com o propósito de reforçar o conteúdo apresentado, utilizando como recurso para a resolução dos problemas de planilha eletrônica programas escritos em linguagem de programação Python e R, voltados para manipulação, visualização e análise de dados, contribuindo assim na tomada de decisão diante de um cenário de incertezas.

O leitor tem em suas mãos uma rica coletânea de exemplos aplicados que evidenciam a capacidade de resolver problemas e analisá-los, os quais são mais importantes do que o simples uso de uma ferramenta computacional. Ou seja, planejar, executar e completar um bom estudo com simulação requer mais do que boas habilidades em programação.

Por fim, agradeço ao Prof. Adriano Maniçoba por me conceder a honra de prefaciar esta obra e o parabenizo pela importante contribuição para o meio acadêmico e profissional, bem como ao Grupo Editorial Alta Books pela publicação.

Prof. Dr. Fernando Gonzales Tavares
(in memoriam)

AMOSTRA

Sumário

	Apresentação	1
—	01 Introdução à simulação	3
	1.1 Conceitos de simulação	5
	1.2 Tipos de simulação	16
	1.3 História da simulação	20
	1.4 Uso de softwares em simulação	21
	1.5 Exercícios propostos	32
—	02 Geração de números aleatórios	35
	2.1 Geradores lineares congruentes	37
	2.2 Exemplo 2.1	37
	2.3 Geradores combinados	39
	2.4 Exemplo 2.2	39
	2.5 Gerando eventos aleatórios	41
	2.6 Geração de números aleatórios em softwares	43
	2.7 Exercícios propostos	49
—	03 Simulação de variáveis aleatórias	51
	3.1 Distribuição empírica	53
	3.2 Distribuição normal	64
	3.3 Distribuição exponencial	71
	3.4 Métodos de geração de variáveis aleatórias	73
	3.5 Exercícios propostos	80
—	04 Variáveis aleatórias relevantes	85
	4.1 Distribuição uniforme	87
	4.2 Distribuição triangular	88
	4.3 Distribuição log-normal	90
	4.4 Distribuição de Weibull	91
	4.5 Distribuição gama	93
	4.6 Distribuição beta	95
	4.7 Distribuição Qui-quadrado	97
	4.8 Distribuição t de Student	98
	4.9 Distribuição de Poisson	99
	4.10 Distribuição binomial	103
	4.11 Exercícios propostos	104

—	05	Modelagem de dados empíricos	111
	5.1	Estimação de parâmetros	113
	5.2	Testes de aderência	120
	5.3	Exercícios propostos	130
—	06	Simulação de Monte Carlo para análise e tomada de decisão	133
	6.1	Analisando os resultados de uma simulação	135
	6.2	Simulação de diferentes cenários	145
	6.3	Desenho de experimentos para simulação de Monte Carlo	150
	6.4	Exercícios propostos	157
—	07	Simulação de Monte Carlo aplicada	159
	7.1	Modelo do vendedor de jornais	161
	7.2	Problemas de estoque	165
	7.3	Gerenciamento de projetos	176
	7.4	Simulação dos preços de ações	179
	7.5	Fluxo de caixa de projetos de investimento	183
	7.6	Simulação da cadeia de suprimentos	190
	7.7	Exercícios propostos	197
—	08	Simulação de filas	201
	8.1	Elementos de um sistema com fila	203
	8.2	Tipos de sistemas com fila	209
	8.3	Indicadores de desempenho	209
	8.4	Simulação de filas em planilha	210
	8.5	Simulação de filas em Python	213
	8.6	Solução analítica dos sistemas de filas	214
	8.7	Exercícios propostos	222
—	09	Simulação de eventos discretos	225
	9.1	Desenvolvimento do modelo conceitual	227
	9.2	Simulação de sistemas de filas com SimPy	228
	9.3	Modelos avançados no SimPy	257
	9.4	Exercícios propostos	265
—	10	Modelos aplicados na simulação de eventos discretos	267
	10.1	Atendimento em caixa de supermercado	269
	10.2	Filas em um lava-rápido	277
	10.3	Transporte cíclico no agronegócio	284
	10.4	Manufatura de automóveis	290
	10.5	Carregamento e pesagem de caminhões	295
	10.6	Locação de carros em aeroportos	303
	10.7	Estações em uma linha de produção	323
	10.8	Tráfego em um cruzamento com semáforo	337
	10.9	Exercícios propostos	353
		Considerações Finais	355
		Referências	357
		Resolução dos exercícios propostos	359
		Glossário de termos técnicos	369
		Índice	371

Apresentação

Este livro aborda a simulação no contexto da tomada de decisão, principalmente aplicada à área de Administração e Engenharia de Produção, trazendo temas de operações, produção, transporte e finanças. A obra pode ser adotada tanto para cursos de graduação quanto de pós-graduação, em disciplinas de Simulação e Pesquisa Operacional, ou aquelas que fazem uso de problemas que podem ser abordados com uso de simulação.

Ao longo da obra, são desenvolvidos os diversos conceitos necessários para aplicar tanto a simulação de Monte Carlo quanto a simulação de eventos discretos. O livro utiliza uma abordagem prática em que as técnicas utilizadas são apresentadas em planilha eletrônica, linguagem Python e R, além de uma extensa prática na forma de exercícios propostos, sem que seja obrigatório um conhecimento prévio em programação.

O diferencial deste livro reside no fato de ser inteiramente dedicado ao tema simulação, sendo que em outras obras ele é tratado em apenas um ou dois capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução à simulação e apresenta exemplos da simulação de Monte Carlo e da simulação de eventos discretos.

Nos capítulos 2, 3 e 4 são apresentados os fundamentos da geração de números aleatórios e diversos modelos de variáveis aleatórias, que podem ser utilizados numa simulação. O capítulo 5 traz a modelagem de dados empíricos e seu ajuste a uma distribuição de probabilidade conhecida.

A simulação de Monte Carlo é mostrada no capítulo 5, bem como a análise de cenários e uma introdução ao desenho de experimentos. No capítulo seguinte, são apresentados diversos modelos aplicados à simulação de Monte Carlo. As filas e sua solução analítica são desenvolvidas no capítulo 8, além de ser proposta uma forma de executar sua simulação.

Por fim, nos capítulos 9 e 10 são desenvolvidos os fundamentos e apresentados diversos casos aplicados da simulação de eventos discretos. Cada capítulo dispõe de diversos exercícios propostos cujas soluções são encontradas ao final do livro, juntamente com um glossário de termos técnicos. Recomendam-se a leitura e o estudo dos temas na ordem em que são apresentados nos capítulos. No início de cada capítulo, o leitor poderá encontrar uma epígrafe que sugere uma reflexão de algum tema tratado no mesmo.

Bons estudos!

AMOSTRA

Introdução à simulação

“Naquele Império, a arte da cartografia alcançou tal perfeição que o mapa de uma única província ocupava uma cidade inteira, e o mapa do Império, uma província inteira. Com o tempo, esses mapas desmedidos não bastaram, e os colégios de cartógrafos levantaram um mapa do Império que tinha o tamanho do Império e coincidia com ele ponto por ponto. Menos dedicadas ao estudo da cartografia, as gerações seguintes entenderam que esse dilatado mapa era inútil e, não sem impiedade, o entregaram às inclemências do Sol e dos Invernos. Nos desertos do Oeste, perduram despedaçadas ruínas do mapa, habitadas por animais e por mendigos; em todo o país não há outra relíquia das disciplinas geográficas.”

Jorge Luiz Borges

– História universal da infâmia (1935)

01



OBJETIVOS DO CAPÍTULO

A simulação é uma ferramenta valiosa para a tomada de decisão sob incerteza. Sua utilização possibilita a quem decide a antecipação de consequências e efeitos de eventos aleatórios, que podem ser analisados sob diferentes cenários. Neste capítulo, serão introduzidos conceitos fundamentais da simulação por meio de exemplos aplicados e serão abordados os principais marcos de sua história. Ao final do capítulo, o leitor será capaz de:

- ◆ Entender os conceitos fundamentais da simulação.
- ◆ Conhecer os principais tipos de simulação.
- ◆ Exercitar os conceitos e tipos de simulação por meio de exemplos aplicados.
- ◆ Conhecer os marcos históricos da simulação.

1.1 Conceitos de simulação

A palavra simulação vem do latim *simulatio*, proveniente do verbo *simulare*, que significa imitar ou fingir. Esse verbo se originou do adjetivo *similis*, que significa semelhante ou similar. O termo também é utilizado para denotar fingimento ou enganação. Aplicada ao contexto de tomada de decisão, é consenso que a simulação assume o papel de reproduzir uma realidade em que há controle de condições por meio de um simulador, a fim de estudar as consequências de eventos aleatórios em cenários distintos.

As correspondências em dicionários da palavra simulação mais adequadas ao nosso propósito convergem para a imitação do funcionamento de um processo, ou ainda, uma experiência em que os modelos têm comportamentos análogos aos da realidade.

Assim, a simulação é o processo de analisar uma realidade por meio de um modelo cujos parâmetros representam um ou mais cenários que se deseja estudar, sendo ainda afetada por eventos aleatórios. O modelo, com seu respectivo cenário e sujeito aos eventos aleatórios, tem seu funcionamento possibilitado por um simulador. Logo, são constituintes de um processo de simulação o modelo, os cenários, os eventos aleatórios e o simulador. Vamos analisar, então, esses conceitos por meio de um exemplo.

1.1.1 Exemplo 1.1

Considere um vendedor de sorvetes cuja demanda em determinado dia é diretamente afetada pelo clima que, de forma simplificada, pode se manifestar por dois eventos aleatórios mutuamente exclusivos: dia ensolarado ou chuvoso, com igual chance de ocorrência, de 50% cada. Sabe-se pelo histórico que, em dias ensolarados, vendem-se, em média, 150 sorvetes e, em dias chuvosos, apenas 50. Cada sorvete é vendido por R\$5 e tem custo de R\$3.

Diante desse contexto, o vendedor de sorvetes pode chegar à Equação 1.1 para calcular seu lucro em um determinado dia:

$$L = 5\{\min[(150x + 50y); Q]\} - 3Q \quad (1.1)$$

No qual:

L : Lucro em um determinado dia.

x : Variável binária que assume o valor de 1 se o dia for ensolarado e 0 se o dia for chuvoso.

y : Variável binária que assume o valor de 1 se o dia for chuvoso e 0 se o dia for ensolarado.

Q : Quantidade comprada de sorvete.