TP 547- Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação

Prof. Samuel Baraldi Mafra

Inatel
Instituto Nacional de Telecomunicações

Objetivo

Abordar fundamentos para a simulação de sistemas de comunicação a serem usadas nas mais diversas pesquisas.

A disciplina é dividida em três partes:

- Fundamentos da simulação;
- Simulação de sistemas contínuos;
- Simulação de sistemas discretos.

Fundamentos da simulação

Programa

- Introdução a simulação;
- Geração de variáveis aleatórias;
- Métodos de Monte Carlo;
- Intervalos de confiança;
- Aplicações e estudos de caso.

Simulação de sistemas contínuos

Programa

- Amostragem e quantização;
- Modelagem e simulação de sistemas lineares;
- Modelagem e simulação de sistemas não lineares;
- Aplicações e estudos de caso.

Simulação de sistemas discretos

Programa

- Introdução à simulação de eventos discretos;
- Introdução a cadeias de Markov;
- Modelagem e estrutura de simuladores de eventos discretos;
- Simulação de sistemas de filas;
- Aplicações e estudos de caso.

Avaliação

- A avaliação será feita através de trabalhos (individual/em duplas) que deverão ser entregues em formato Powerpoint com a resolução analítica dos exercícios e os resultados de simulação. Devem ser anexados os arquivos fontes com autoria e comentados.
- Atividades- 30%, trabalhos ao final de cada etapa da disciplina 70%

Bibliografia

- William Tranter, K. Shanmugan, Theodore Rappaport, and Kurt Kosbar. 2003. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications (First ed.). Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Michel C. Jeruchim, Philip Balaban, K. Sam Shanmugan. 2003. Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques (Second ed.). Springer Science & Business Media, 2000.
- S.M. Ross, Simulation, 5th Edition, Academic Press, 2013
- Fishman, George S. Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis. Springer Science & Business Media, 2013.
- Banks, Jerry et al. Discrete-event system simulation. Pearson, 2005.

Para se obter resultados de um determinado experimento podemos usar de três artifícios:

- Experimentos reais;
- Expressões analíticos;
- Simulações.

As simulações podem auxiliar muito no processo na pesquisa, por exemplo em situações onde experimentos reais não são possíveis, expressões analíticas são muito complexas ou simplesmente em situações que queremos comprovar uma teoria através de dois artifícios.

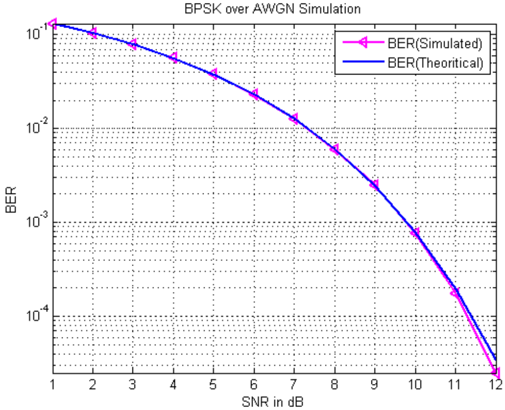
Simulação

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. (Schriber, 1974)

Simulação de Eventos Aleatórios

Objetivo da simulação

O principal objetivo com as simulações não é obter números e sim ganhar conhecimento. (Richard Hamming)



Aplicações

- Economia;
- Astronomia;
- Química;
- Telecomunicações;
- Biologia;
- Medicina.

Por que simular?

- Custo;
- Tempo;
- Complexidade;
- Fazer testes que não são possíveis em laboratório;
- Responder com mais segurança questões como "o que aconteceria se".

Por que não simular?

- Problema trivial de senso comum;
- Problema que pode ser resolvido facilmente analiticamente;
- Quando a simulação custa mais que experimentos diretos;
- Limitação de recursos e tempo;
- Falta de informações sobre o experimento.

Regras de Ouro da Simulação

Regras de Ouro da Simulação

- Comece simples;
- Saiba o que o seu modelo pode mostrar;
- Simule somente resultados importantes;
- Tenha foco nos objetivos.

Simulação Determinística e Simulação Aleatória

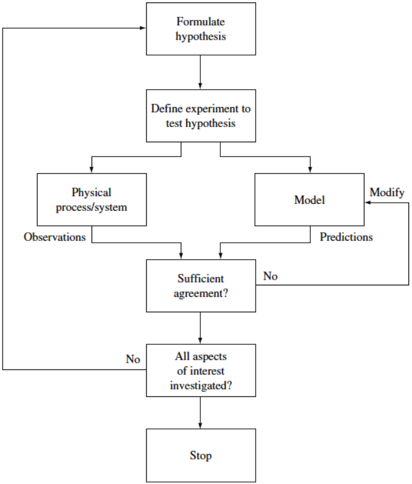
Tipos de Simulação

- Determinística:
  - As condições nas quais uma experiência é realizada determinam o resultado exato do experimento;
  - A solução de um conjunto de equações matemáticas especifica o resultado exato do experimento;
  - Ex: Modelos envolvendo teoria de circuitos elétricos.
- Aleatória:
  - Os resultados variam de forma impredizível quando o experimento é repetido sob as mesmas condições.
  - Ex:Instante de chegada dos pacotes, condições dos canais de comunicação.

Fases de projeto para uma simulação

- Definição do problema;
- Definição das componentes do sistema e métricas de avaliação;
- Formulação de um modelo;
- Coleta de dados reais;
- Tradução do modelo em uma linguagem de programação;
- Verificação e validação do modelo;
- Experimentos e análises;
- Documentação.

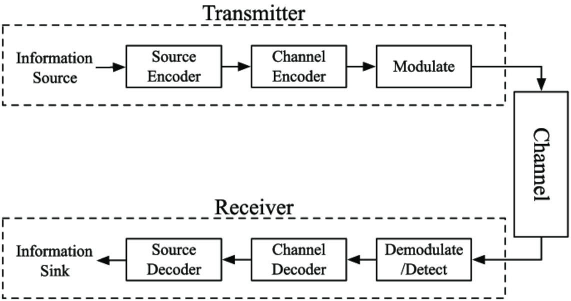
Simulação de Eventos Aleatórios



Sistema

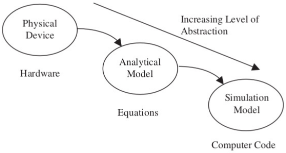
Definição

Um sistema, é um conjunto de elementos interdependentes de modo a formar um todo organizado. Um grupo de unidades e combinação de meios e processos que visem à produção de certo resultado.



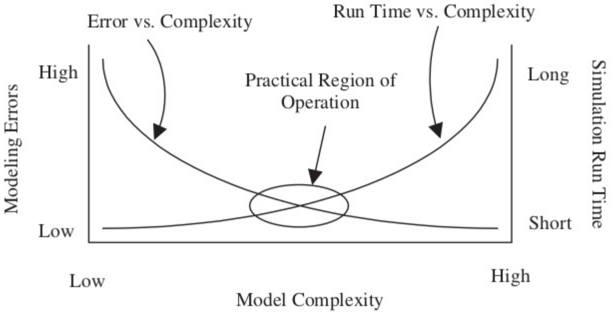
Modelo

- Um modelo é uma representação aproximada de uma situação física.
- Um modelo tenta explicar o comportamento observado usando um conjunto de regras simples e compreensíveis.
- Essas regras podem ser usadas para prever o resultado de experimentos envolvendo uma determinada situação física. Um modelo útil explica todos os aspectos relevantes de uma determinada situação.
- Economia de tempo, dinheiro.



Simulação de Eventos Aleatórios

Quanto mais informações se conhece sobre o sistema, mais preciso vai ser o modelo, entretanto aumenta também a complexidade e os requerimentos computacionais.



Softwares/linguagens de simulação genéricos:

- Matlab;
- Wolfram Mathematica;
- C;
- Python.

Vantagens de uso do Python:

- Linguagem simples;
- Fácil aprendizado;
- Grande quantidade de bibliotecas úteis;
- Integração maior com sistemas de inteligência artificial, visão computacional e internet das coisas.

Ferramentas necessárias

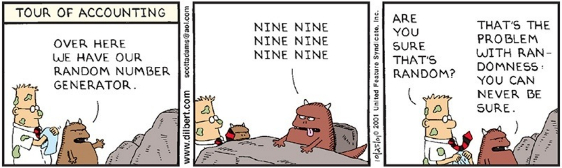
- Python 3.8 - offline; https://www.python.org/
- PyCharm - offline https://www.jetbrains.com/pt-br/pycharm/
- Jupyter - online https://jupyter.org/

Geração de variáveis aleatórias

- Os sistemas possuem eventos que ocorrem de maneira aleatória, como chegadas de pacotes em um buffer, ruído térmico no receptor, etc.
- Para simular estes efeitos precisamos entender como eles ocorrem e suas respectivas distribuições.
- Para isso iremos analisar formas de gerar números "aleatórios" para simular os eventos.

Geração de Variáveis Aleatórias

- Geração física de números aleatórios ou geração de numeros aletórios verdadeira (TRNG);
  - Ruído térmico;
  - Efeito fotoelétrico
  - Fenômeno quântico.
- Geração de números pseudo-aleatórios (PRNG);
  - A geração é baseada em um algoritmo que gera uma seqüência de números;
  - Os números são aproximadamente independentes entre eles.


TOUR OF ACCOUNTING
OVER HERE WE HAVE OUR RANDOM NUMBER GENERATOR.
NINE NINE NINE NINE NINE NINE
ARE YOU SURE THAT'S RANDOM?
THAT'S THE PROBLEM WITH RANDOMNESS: YOU CAN NEVER BE SURE.
www.dilbert.com
scottadams@aol.com
© 2001 United Feature Syndicate, Inc.

Aplicação	Gerador
Loteria, jogos e amostragem	TRNG
Simulação	PRNG
Segurança	TRNG

Propriedade	TRNG	PRNG
Repetibilidade	Não	Sim
Tempo de geração	Lento	Rápido
Custo computacional	Alto	Baixo

Características de números pseudoaleatórios

- Os números pseudoaleatórios são chamados assim pois são gerados através de um algoritmo computacional;
- Como algo pode ser verdadeiramente aleatório se há um procedimento detalhado para geração deste;
- A geração é iniciada por um valor inicial conhecido como semente ou *seed*.

Qualquer pessoa que considere métodos aritméticos de produção de dígitos aleatórios está, é claro, em estado de pecado - John Von Neumann

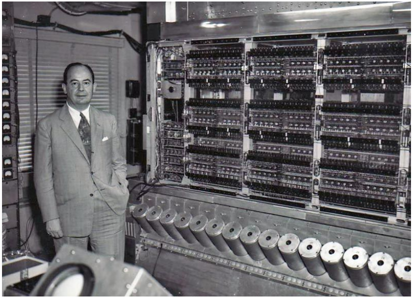
Propriedades desejáveis dos geradores números pseudoaleatórios

- Deve ser computacionalmente eficiente: O gerador deve gerar milhões de números aleatórios no menor tempo possível;
- O período de simulação deve ser o mais longo possível para evitar que repetições de sequências;
- Os sucessivos valores devem ser independentes e uniformemente distribuídos, a correlação deve ser pequena entre os diversos valores.

Método do Quadrado do Meio

Método do Quadrado do Meio

- Método inventado por John Von Neumann;
- Escolhe-se uma *seed* inicial e eleva-se ao quadrado;
- Os dígitos do meio do número gerado são usados para a geração do próximo número da sequência.



Exemplo: Geração de sequência de números aleatórios de 3 dígitos.

- $X_0 = 123$
- $123^2 = 15129 \longrightarrow x_1 = 512;$
- $512^2 = 262144 \longrightarrow x_2 = 214;$
- $214^2 = 45796 \longrightarrow x_3 = 579;$
- $579^2 = 335241 \longrightarrow x_4 = 524;$
- $524^2 = 274576 \longrightarrow x_5 = 457;$

Desvantagem

Quando um zero é gerado, todos os números gerados na sequência serão zero.

Métodos de Geração

- Geradores Congruentes Lineares;
- Gerador Marsaglia;
- Mersenne Twister.

Geradores Congruentes Lineares Mistos

Gerador

$$x_{n+1} = (ax_n + c) \; mod \; m$$

- a é uma constante multiplicadora;
- c é o incremento;
- x_0 é a semente;
- m representa o módulo. A operação mod representa o resto da divisão do número pelo módulo.

Geradores Congruentes Lineares Mistos

Gerar 10 valores para o gerador GCLM abaixo

$$
\begin{aligned}
x_{n+1} = (3x_n + 2)\ mod\ 13 \\
x(0) = 1
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Qual é o período do gerador?

Geradores Congruentes Lineares Mistos

Escolha dos parâmetros

- O módulo de m deve ser grande. Uma vez que os valores de x estarão entre 0 e $m - 1$, o período nunca será maior do que m;
- Para que a computação de $mod\ m$ seja eficiente, m deve ser uma potência de 2, isto é, 2^k. Neste caso, o $mod\ m$ poderá ser obtido truncando-se o resultado à direita por k bits;

Geradores Congruentes Lineares Mistos

$$x_{n+1} = (x_n + 2) \; mod \; 8$$
$$x(0) = 1 \tag{2}$$

- 1- 0001
- 3- 0011 .
- 5- 0101
- 7- 0111
- 9- 1001

Geradores Congruentes Lineares Mistos

Escolha dos parâmetros

- Se c for diferente de zero, o máximo período possível m é obtido se e somente se:
  a) os inteiros m e c sejam primos, um em relação ao outro, isto é, não possuam nenhum outro divisor além de 1;
  b) todo número primo que é um divisor de m, é também um divisor de $a - 1$;
  c) $a - 1$ é um múltiplo de 4, se o inteiro m é múltiplo de 4.

Geradores Congruentes Lineares Mistos:Exemplo

$m = 2^4$, $a = 5$, $c = 1$, período $\rho = 2^4 = 16$

- $x_{n+1} = (5x_n + 1)\ mod\ 16$
- $x_0 = 1$
- $x_1 = (5 * 1 + 1)\ mod\ 16 = 6$
- $x_2 = (5 * 6 + 1)\ mod\ 16 = 15$
- $x_3 = (5 * 15 + 1)\ mod\ 16 = 12;$

$m = 2^4$, $a = 5$, $c = 1$, período $\rho = 2^4 = 16$

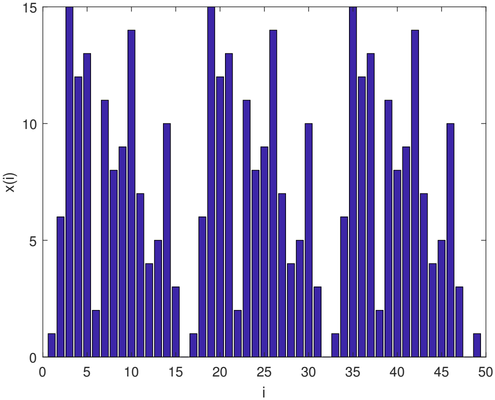
- $x_{n+1} = (5x_n + 1)\ mod\ 16$
- $x_0 = 1$
- $x_1 = (5 * 1 + 1)\ mod\ 16 = 6$
- $x_2 = (5 * 6 + 1)\ mod\ 16 = 15$
- $x_3 = (5 * 15 + 1)\ mod\ 16 = 12;$
- $x_4 = 13;$
- $x_5 = 2;$
- $x_6 = 11;$
- $x_7 = 8;$
- $x_8 = 9;$
- $x_9 = 14;$
- $x_{10} = 7;$
- $x_{11} = 4;$
- $x_{12} = 5;$
- $x_{13} = 10;$
- $x_{14} = 3;$
- $x_{15} = 0;$
- $x_{16} = 1;$
- $x_{17} = 6;$
- $x_{18} = 15;$
- $x_{19} = 12;$

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x=1
x1=np.array([x])
n=48
a=5
c=1
m=pow(2,4)
for i in range(n):
        x=(a*x+c)%m
        x1=np.append(x1,x)
print(x1)
ind=np.arange(n+1)
plt.bar(ind, x1)
plt.show()

# geradorlcgmisto.py
```

Geradores Congruentes Lineares Mistos:Exemplo



Avaliar o período para os seguintes geradores:

- $m = 2^4$, $a = 1$, $c = 1$;
- $m = 2^4$, $a = 7$, $c = 1$;
- $m = 2^6 - 2$, $a = 5$, $c = 1$;

Geradores Congruentes Multiplicativos

Gerador com $m = 2^k$

$$x_{n+1} = (ax_n)\ mod\ m$$

- São mais eficientes que os geradores mistos por não fazerem a operação da adição;
- Período máximo quando $m = 2^k$;
- Com m potência de 2, o maior período possível será $\rho = 2^{k-2}$, considerando que: x_0 (semente) seja um número impar e o multiplicador a seja dado por $a = 8i + 3$ ou $a = 8i + 5$, para algum $i = 0, 1, 2, ...$.

Geradores Congruentes Multiplicativos:Exemplo

$m = 2^4$, $a = 5$

- $x_{n+1} = (5x_n)\ mod\ 16$
- $x_0 = 1$
- $x_1 = (5 * 1)\ mod\ 16 = 5$
- $x_2 = (5 * 5)\ mod\ 16 = 9$
- $x_3 = 13;$
- $x_4 = 1;$

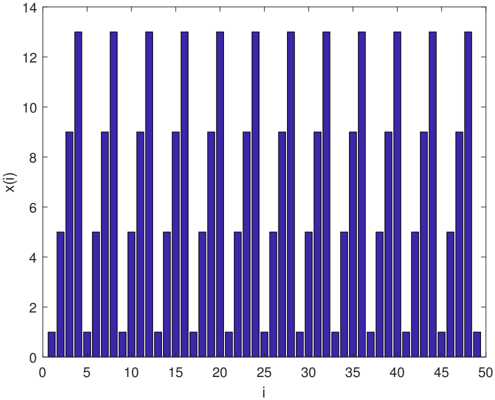
Gerador Congruente Multiplicativo geradormultiplicativo.py

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

x=1
x1=np.array([x])
n=16
a=5
m=pow(2,4)
for i in range(n):
        x=(a*x)%m
        x1=np.append(x1,x)
print(x1)
```

Geradores Congruentes Multiplicativos:Exemplo

$$\rho = 2^{k-2} = 2^{4-2} = 4$$



Geradores Congruentes Lineares Mistos:Exemplo

Avaliar o período para os seguintes geradores:

- $m = 2^4$, $a = 5$,$x_0 = 2$;
- $m = 2^4$, $a = 7$,$x_0 = 1$;

Geradores Congruentes Multiplicativos

Gerador com $m \neq 2^k$

$$x_{n+1} = (ax_n) \; mod \; m$$

- Período máximo $\rho = m - 1$ quando a é uma raiz primitiva de m e m é um número primo.

a é uma raiz primitiva de m se, e somente se, $a^n mod\ m \neq 1$ para $n = 1,2,3,...,m-2$.

$$\begin{array}{rclclclclcl}
3^1 & = & 3 & = & 3^0 \times 3 & \equiv & 1 \times 3 & = & 3 & \equiv & 3 \pmod 7 \\
3^2 & = & 9 & = & 3^1 \times 3 & \equiv & 3 \times 3 & = & 9 & \equiv & 2 \pmod 7 \\
3^3 & = & 27 & = & 3^2 \times 3 & \equiv & 2 \times 3 & = & 6 & \equiv & 6 \pmod 7 \\
3^4 & = & 81 & = & 3^3 \times 3 & \equiv & 6 \times 3 & = & 18 & \equiv & 4 \pmod 7 \\
3^5 & = & 243 & = & 3^4 \times 3 & \equiv & 4 \times 3 & = & 12 & \equiv & 5 \pmod 7 \\
3^6 & = & 729 & = & 3^5 \times 3 & \equiv & 5 \times 3 & = & 15 & \equiv & 1 \pmod 7 \\
3^7 & = & 2187 & = & 3^6 \times 3 & \equiv & 1 \times 3 & = & 3 & \equiv & 3 \pmod 7
\end{array}$$

Geradores Congruentes Multiplicativos:Exemplo

$$x_{n+1} = (3x_n)\ mod\ 31\ \rho = m - 1 = 30$$