UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais

PCS 2039
Modelagem e Simulação de Sistemas Computacionais

Graduação em Engenharia de Computação

4o. Módulo Acadêmico - 2017

IV - Modelos de Simulação de Eventos Discretos

Agenda

- 4.1 Conceitos de Modelos de Simulação;
- 4.2 Metodologia de Análise de Desempenho por Simulação;
- 4.3 Simuladores de Eventos Discretos;
- 4.4 Escolha das distribuição de probabilidade dos Parâmetros de Entrada;
- 4.5 Construção de Simuladores;
- 4.6 Ferramentas de Simulação (Arena);
- Exercícios e Trabalho

1 - Conceitos de Modelos de Simulação

Modelos Simulação:

- Simulador: representa o comportamento do sistema em uma escala de tempo.
- Uma das alternativas para análise de desempenho;
- Situações válidas para sua aplicação.
- Vantagens:
  - Situações em que o modelos matemáticos (analíticos) não permitem representar um Sistema do Mundo Real;
  - Permite fazer estimativas (predição);
  - Permite controle do experimento;
- Desvantagens:
  - Os resultados obtidos são estimativas;
  - O modelo de simulação em geral é caro.

Modelos Simulação:

- **Dificuldades que levam ao insucesso da Simulação:**
  - ✓ **Falha na identificação dos objetivos da Simulação;**
  - ✓ **Nível de detalhe de simulação (Pouco ou Muito);**
  - ✓ **Falha na interação com a gerência;**
  - ✓ **Falha na obtenção dos parâmetros de carga;**
  - ✓ **Ferramenta de simulação inadequada;**
  - ✓ **Desconhecimento da teoria de simulação (a ferramenta de simulação não é suficiente).**

1 - Conceitos de Modelos de Simulação

Modelos Simulação - Classificação:

- **Modelo de Simulação Discreto:**
  - **Utilizam variáveis que assumem valores discretos;**
- **Modelo de Simulação Contínuo:**
  - **Variáveis dependente do tempo assumem valores contínuos.**

- **Modelo de Simulação Determinístico:**
  - **Os resultados do modelos (variáveis) podem ser determinados com precisão.**
- **Modelo de Simulação Estocástico ou Probabilístico:**
  - **As variáveis ocorrem de acordo com uma distribuição probabilística.**

1 - Conceitos de Modelos de Simulação

Modelos Simulação - Classificação:

- **Modelo de Simulação de Tempo Real:**
  - **Os eventos são tratados na mesma escala de tempo correspondente ao Sistema Real;**
- **Modelo de Simulação de Tempo Simulado:**
  - **Não acompanha a escala de evolução de tempo do Sistema Real.**

- **Modelo de Simulação Dinâmica:**
  - **Os valores das variáveis modificam-se ao longo do Tempo.**
- **Modelo de Simulação de Tempo Estático:**
  - **Os valores das variáveis não variam com o Tempo (Modelo de Simulação de Monte Carlo).**

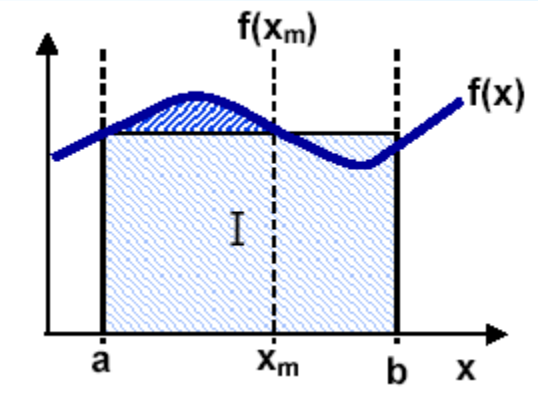
1 - Conceitos de Modelos de Simulação

Modelos Simulação – Exemplo: Método de Monte Carlo:

- Método utilizado quando um modelo analítico não pode ser utilizado;
- Princípio: Uso da geração de números aleatórios como parâmetros para obter resultados da simulação
- Exemplo: Cálculo de Integral com resolução não determinada.
  - Função:

$$I = \int_a^b f(x)dx$$

  - Integral corresponde a área do retângulo (em Xm):



  - Resolução: Sorteio aleatório de Xi entre [a,b]:

$$I \cong \frac{\sum_{i=1}^{n} (b-a)f(x_i)}{n}$$

- **método simulado, estático, estocástico e com valores contínuos**

2 – Metodologia de Análise de Desempenho por Simulação

Fases:

2.1 – Formular e planejar o problema:

- Definir Objetivos;
- Métricas de desempenho;
- Carga de Teste a ser usada;
- Identificação de possíveis Ferramentas de Simulação;
- Cronograma.

2.2 – Coletar dados

- Dados sobre a arquitetura do Sistema;
- Dados referentes aos Parâmetros (Fatores) de Carga.

2.3 – Análise estatística dos Parâmetros:

- Identificar a distribuição estatística mais adequada para os dados;
- Ou amostras a serem utilizadas.

2.4 – Definição do Modelo

- Consolidação das Informações anteriores;

2.5 – Validar o Modelo (*Walk-through*)

2.6 – Escolha da Ferramenta

- Características da Simulação X Capacitação X Recursos Disponíveis

2.7 – Implementar e testar o Modelo;

2.8 – Planejar os experimentos;

2.9 – Executar as simulações;

2.10 – Analisar os dados de Saída e Documentar os resultados.

3 – Simulação de Eventos Discretos

- **Caracterização do Modelo de Simulação Abordado no curso:**
  - ✓ **Discreto;**
  - ✓ **Dinâmico;**
  - ✓ **Estocásticos (Probabilísticos).**

Outros tipos aplicados a Computação:

- ✓ **Emulação (terminal, máquina virtual, etc);**
- ✓ **Simulação Estática;**
- ✓ **Simulação ordenada por registros de tempo (escalonamento de processos em S.O.);**

3 – Simulação de Eventos Discretos

Definições usadas em Simulação de Evento Discreto:

Os **objetos** em um sistema de eventos discretos são chamados de **entidades**.

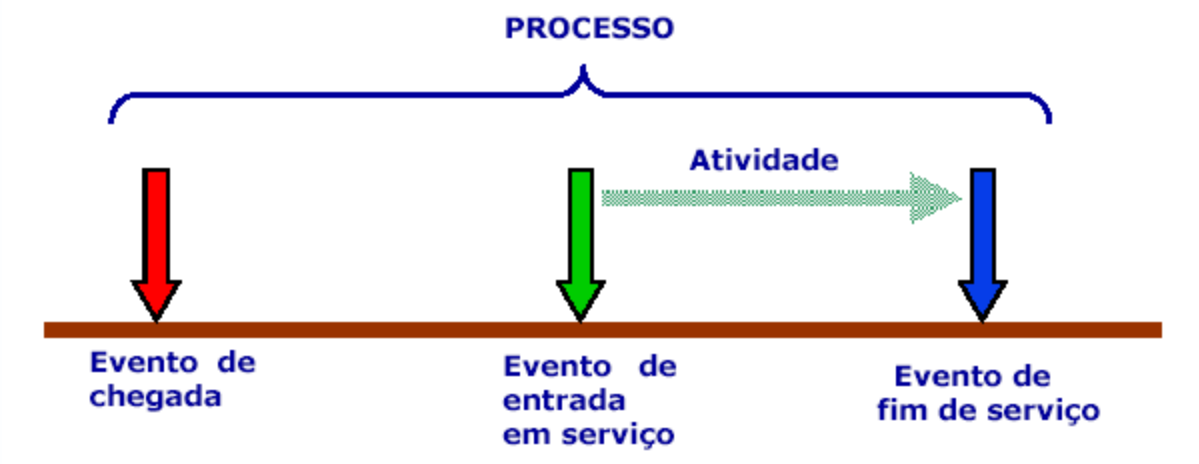
As **entidades** são caracterizadas pelos seus **atributos**.

O **estado do sistema** é definido pelos valores de seus **atributos**.

A **mudança de estado** é determinada pela ocorrência de um **evento** em um **tempo** estocástico ou determinístico.

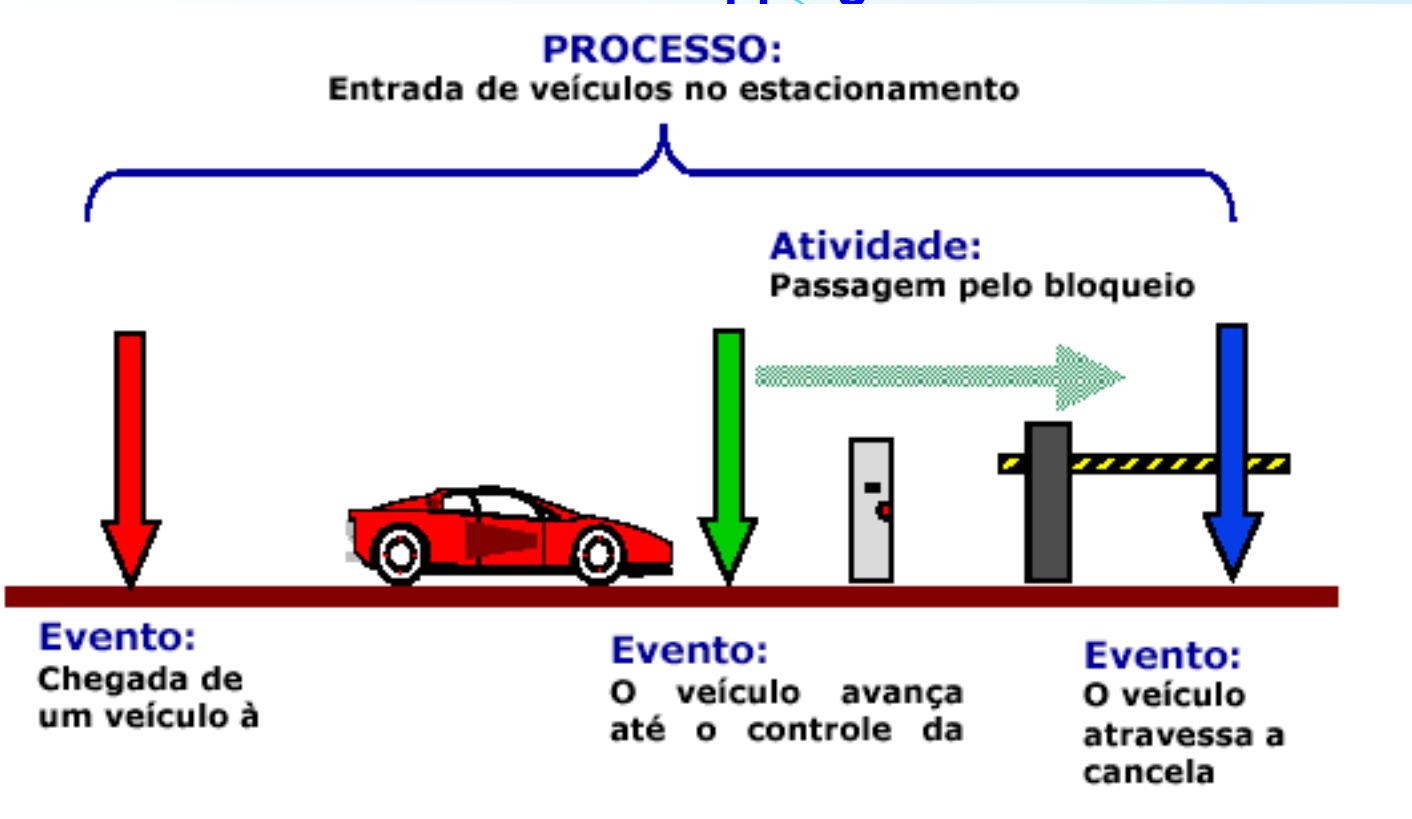
3 – Simulação de Eventos Discretos

- **Formulação do Modelo de Simulação Discreta:**
  - **Definição das mudanças de estado que podem ocorrer em cada tempo de evento;**
  - **Descrição das atividades que promovem a mudança de estado;**
  - **Descrição do processo.**



3 – Simulação de Eventos Discretos

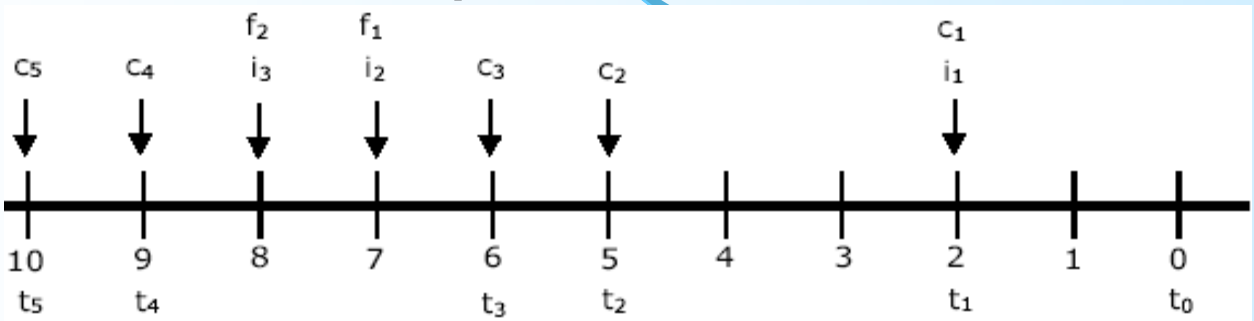
❖ **Exemplo**: **Modelo de Simulação Discreta de Entrada de Estacionamento em Shopping**



3 – Simulação de Eventos Discretos

❖ Exemplo: Entrada de Estacionamento em Shopping

Gráfico dos eventos nos tempos:



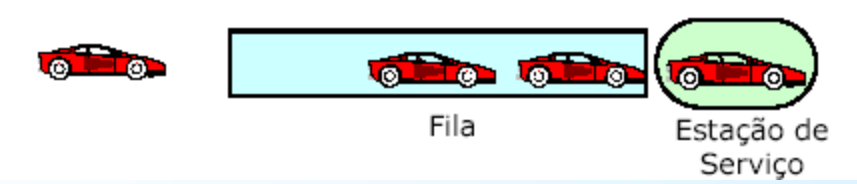
Variáveis:

C: (Carro), T: (Tempo que chegou o carro C);

I: Início do Atendimento;

F: Fim do Atendimento

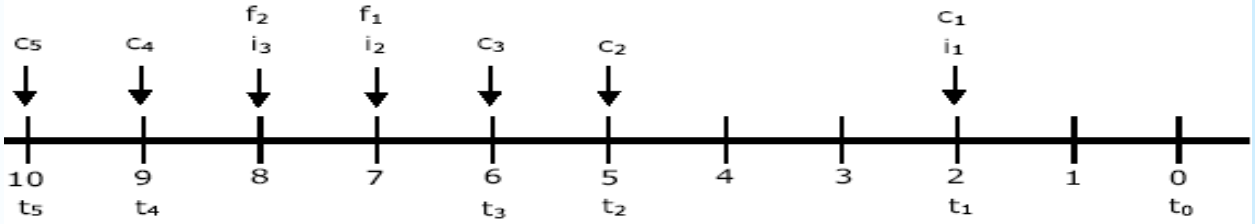
Entidades:



3 – Simulação de Eventos Discretos

❖ **Exemplo:** Entrada de Estacionamento em Shopping

Execução da Simulação:



Tempo de simulação	Evento	Prox.Evento chegada	Prox.Evento Inic. Atend.	Prox.Evento Fim Atend.	Número na fila	Estado do servidor
0		c_1 em $t_1=2$			0	livre
1					0	livre
2	c_1	c_2 em $t_2=5$	i_1 em $t=2$		1	livre
	i_1			f_1 em $t=7$	0	ocupado
3					0	ocupado
4					0	ocupado
5	c_2	c_3 em $t_3=6$			1	ocupado
6	c_3	c_4 em $t_4=9$			2	ocupado
7	f_1		i_2 em $t=7$		2	livre
	i_2			f_2 em $t=8$	1	ocupado
8	f_2		i_3 em $t=8$		1	livre
	i_3			f_3 em $t=11$	0	ocupado
9	c_4	c_5 em $t_5=10$			1	ocupado
10	c_5	c_6 em $t_6=12$			2	ocupado
11	f_3		i_4 em $t=11$		2	livre
	i_4			f_4 em $t=13$	1	ocupado

3 – Simuladores de Eventos Discretos

- **Principais Modelos de Eventos Discretos:**
  - **Modelos orientados a evento: definido pelas mudanças de estados que ocorrem no tempo do Evento;**
  - **Modelos orientados a processos: definido pelo processo pelo qual as entidades são conduzidas.**

Simulador Orientado a Eventos:

- **Evento implementado como procedimento;**
- **Execução cíclica:**
  - **Escala Eventos;**
  - **Atualiza o relógio para o próximo evento;**
  - **Executa o procedimento associado ao evento.**
- **Elementos de um simulador:**
  - **Lista de Eventos L = {(e1, t1,), (e2, t2) ...}**
  - **Estado do Sistema: conjunto de variáveis de estado que descrevem um Estado;**
  - **Mecanismo de temporizarão: Incrementos fixos e próximo evento.**
  - **Lógica de Simulação: Execução Cíclica;**
  - **Métodos estatísticos usados para analise de distribuição dos valores de entrada e de saída.**

3 – Simuladores de Eventos Discretos

Simulador Orientado a Processos:

- Gerenciamento de Processos;
- Elementos de um simulador:
  - Entidades: usuários dos serviços fornecidos pelo Processo;
  - Atributos: caracterizam as entidades
  - Processos: ações executadas sobre a entidade;
  - Recursos: fornecem recursos as entidades.
  - Filas: local onde as entidades aguardam recursos.
- Exemplo:

Tipo de sistema	Entidades	Atributos	Recursos	Filas
Manufatura	~~Partes~~ Peças	Código de peças, datas de entrega	Máquinas, trabalhadores	Filas, estoques
Comunicações	Mensagens	Destino, comprimento da mensagem	Nós, enlaces	Buffers
Aeroporto	Aviões	Número do vôo Capacidade	Pistas, terminais	Filas de passageiros, de aviões.
Supermercados	Compradores	Tamanho da compra	Caixas	Filas

4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

As aplicações de Simulação dependem de parâmetros de entrada onde os valores tem as seguintes características:

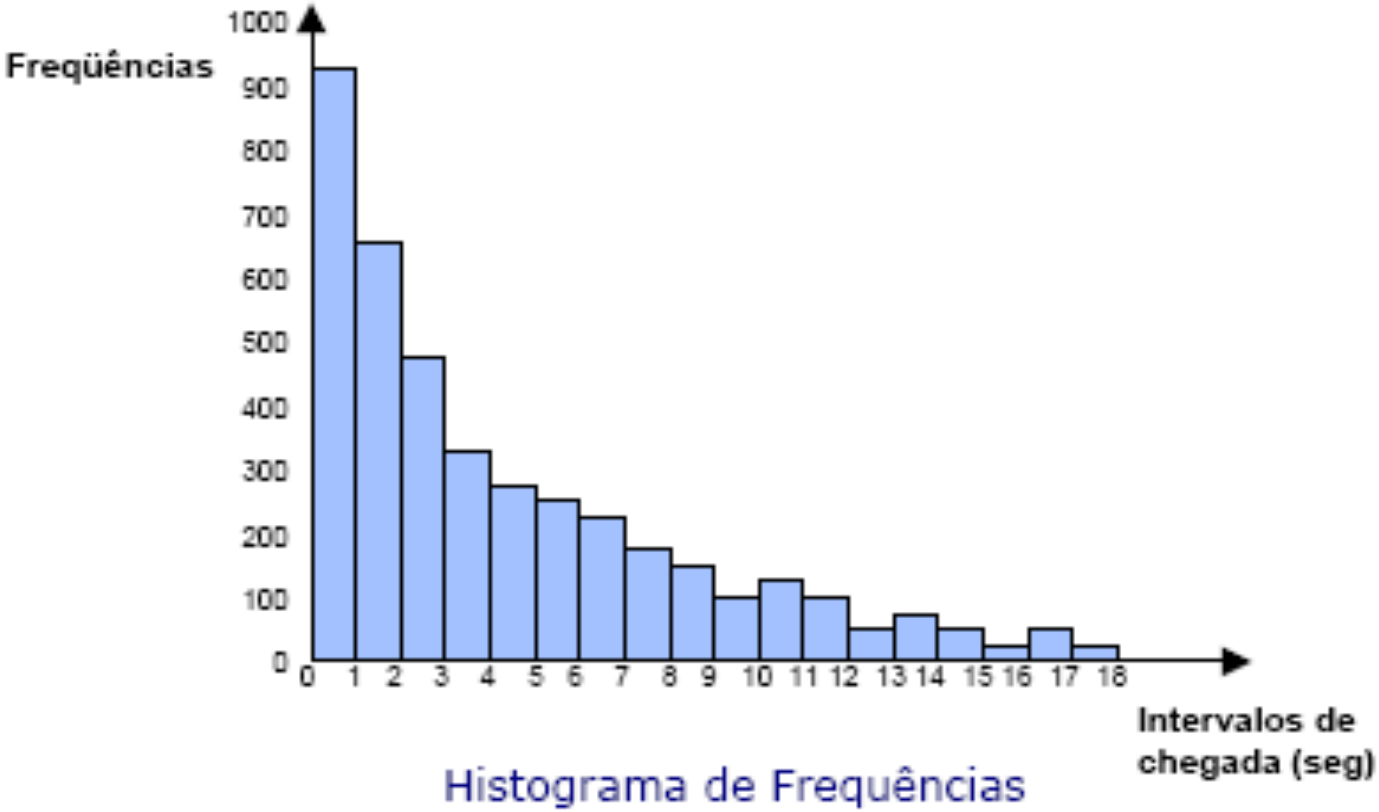
- ➔ **Discretos,**
- ➔ **Dinâmicos,**
- ➔ **Probabilísticos (não determinísticos).**

- ❖ **Problema: Levantar parâmetros de simulação que representem uma amostra de acordo com o comportamento esperado no Sistema Real.**
- ❖ **O que deve ser feito:**
  - a **Realizar observações no Sistema Real ou levantar estimativas de ocorrência dos parâmetros de entrada;**
  - b **Gerar a simulação (usando os dados observados ou gerar os dados de acordo com uma função de distribuição).**

4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

a) Dados Observados:

Representar os dados usando histogramas relacionando freqüência com o Fator observado:



Histograma de Frequências

4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

b) Geração da Carga de Teste:

- **Utilizar os dados observados;**
- **Ajustar a uma <u>função de densidade</u>:**
  - **Exemplo de função densidade: Normal, Poisson, Binomial, etc.**
  - **Aplica-se testes aderência da amostra com as possíveis distribuições, tais como Chi-quadrado e Kolmogorov-Smirnov;**
  - **Utilizar ferramentas disponíveis em pacotes estatísticos.**

4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

Geração aleatória dos Parâmetros de Carga:

- Geração de números aleatórios;
- Ajustar o número de acordo com a função de distribuição.

Geração de Números Aleatórios:

- Uso de Bibliotecas de linguagens de programação [0,1];
- Técnica utilizada: Congruência Linear.

$$X_{k+1} = (aX_k + c) \bmod m, \text{ para } K = 0, 1, 2...$$

- Constantes:a: Multiplicador, c: incremento, m é módulo e X_0: valor inicia (semente);
- Geração de números aleatório $\{U_1, U_2,...\}$, no intervalo de [0,1], $U_k = X_k/m$;

- Geradores computacionais são pseudo-aleatórios (semente);

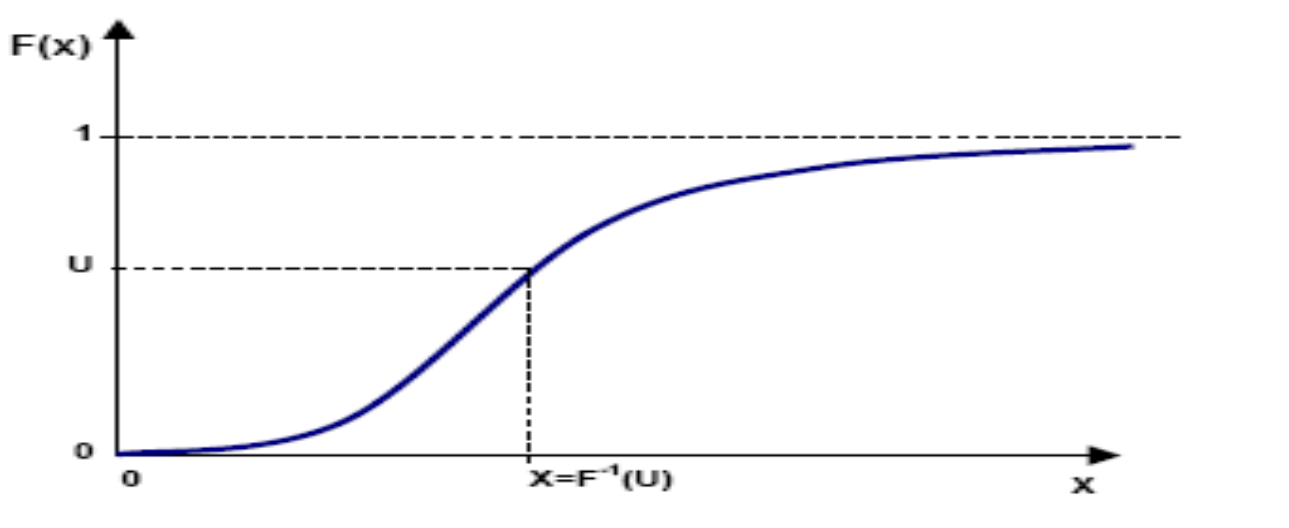
4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

Geração aleatória dos Parâmetros de Carga:

- Geração de números aleatórios (Fator);
- Ajustar o número de acordo com a função de distribuição.

Ajustar o número de acordo com a função de distribuição de probabilidade.

- Método da Transformada Inversa:



- Para gerar a amostra aleatória x, gera-se um número aleatório u e então resolve-se a equação $x = F^{-1}(u)$

4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

Exemplo de Transformada Inversa:

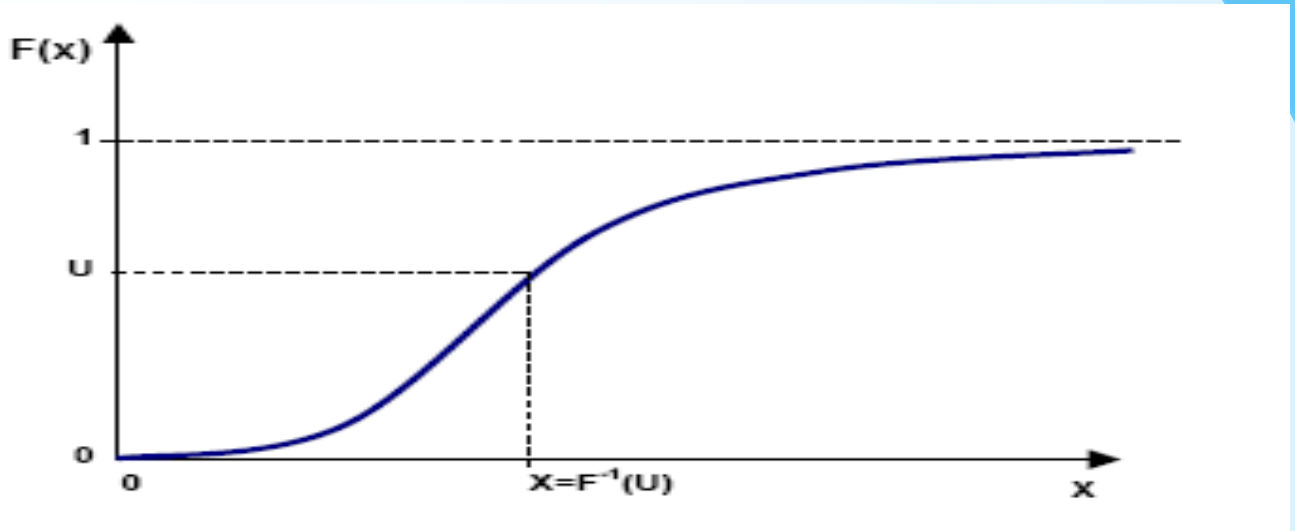
Considerando que a frequência de uma amostra tem uma aderência a uma função exponencial, f(x):

$$f(x) = e^{-\lambda x}$$

A função de distribuição de probabilidade (Função de Distribuição Acumulada) F(x):

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$$

$$F^{-1}(x) = u \Rightarrow x = -(1/\lambda)\ln(1-u)$$



4 – Escolha das Distribuições de Probabilidade dos Parâmetros de Entrada

Exercício de Distribuição Discreta:

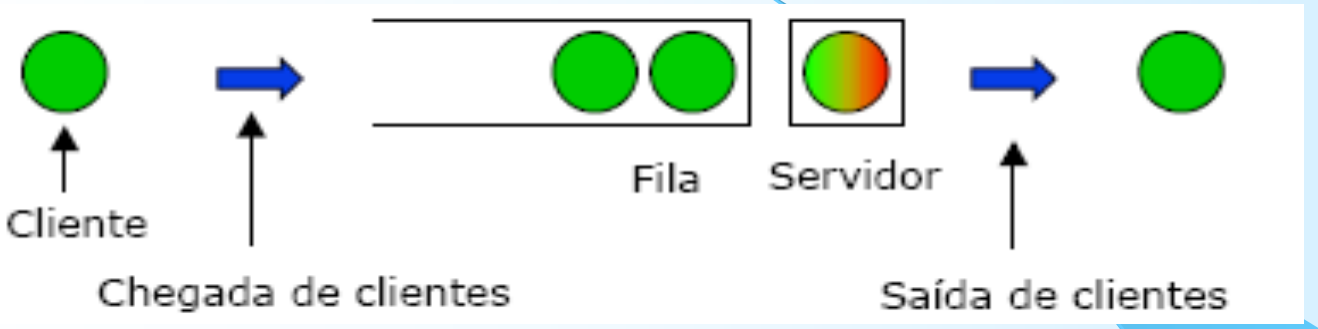
Considere que numa rede de computadores os tamanhos dos pacotes foram medidos de acordo com a seguinte probabilidade:

Tamanho (Bytes)	Probabilidade
64	0.7 (70%)
128	0.1 (10%)
512	0.2 (20%)

Baseado no levantamento anterior, encontre a função para geração aleatória de pacotes.

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Considere o Exemplo: Fila e Servidor.



- **Estratégias de Atendimento: FCFS ou FIFO.**
- **Variáveis (Fatores) a serem consideradas:**
  - **Intervalo de chegada dos clientes (A_1, A_2,..., A_n);**
  - **Tempo de Serviço (S_1, S_2,..., S_n).**
- **Variáveis do Modelo Discreto são caracterizadas por serem:**
  - **<u>Independentes e Aleatórias e Identicamente Distribuídas (IID)</u>**

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Usando a abordagem de Simulação Orientado a Eventos:

- **Eventos correspondem a Procedimentos do Simulador.**

No Exemplo da Fila de Supermercado. Eventos:

- **Procedimento de Evento de Chegada de Clientes a Fila;**
- **Procedimento de Atendimento de Serviço.**

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Procedimento do Evento de Chegada no Sistema:

```
Definir o tempo do próximo evento de chegada;
se o servidor está Ocupado então {
      Somar um ao número de clientes na fila;
      Se a fila está cheia então retorna ("ERRO");
      Armazenar instante de chegada deste Cliente;
} senão {/* realiza o atendimento do cliente */
      definir a espera do cliente em fila como 0;
      acumular estatísticas;
      somar 1 ao contador de clientes atendidos;
      mudar o estado do servidor para Ocupado;
      definir o tempo de fim de atendimento do cliente;
}
retornar
```

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Procedimento do Evento de Atendimento de Serviço:

```
se a fila esta vazia então mudar o estado do servidor para livre;
senão {/* selecionar um cliente da fila para execução */
      subtrair 1 do contador de clientes na fila;
      calcular o tempo de espera em fila do cliente;
      calcular o tempo de serviço do cliente;
      acumular estatísticas;
      mudar o estado do servidor para ocupado;
      somar 1 ao contador de clientes atendidos;
      avançar a fila uma posição para a frente;
}
retornar
```

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Obtenção de medidas de desempenho

- **Tempo médio de Clientes na Fila:**

$$\hat{d}(n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n}$$

sendo:

- **Di: O tempo da fila cada Cliente;**
- **n: número de Clientes atendidos.**

- **Tempo Médio de Clientes no Sistema:**

$$\hat{r}(n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (f_i - t_i)}{n}$$

sendo:

- **r_i o tempo que o cliente *i* ficou no sistema;**
- **$r_i = f_i - t_i$ (tempo de saída menos tempo de chegada).**

5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Obtenção de medidas de desempenho:

- **Número médio de Clientes na Fila:**

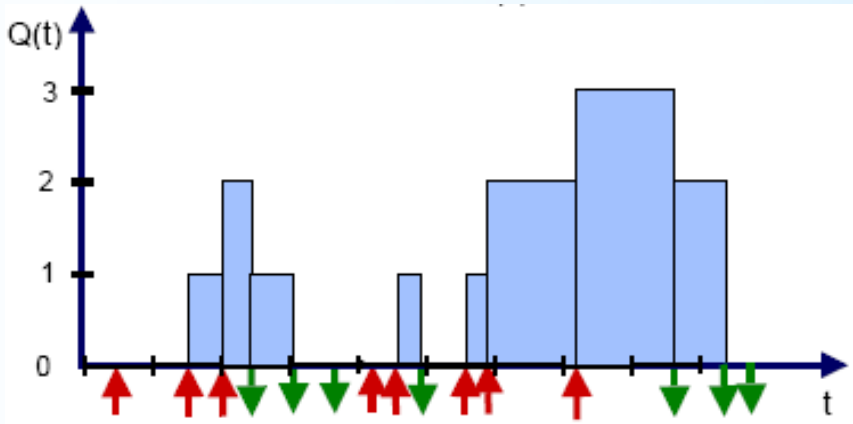
$$\hat{q}(n) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} iT_i}{T(n)}$$

sendo:

- **Ti: O Tempo que a fila ficou com *i* clientes;**

$$\sum_{i=0}^{\infty} iT_i = \int_0^{T(n)} Q(t)dt$$

$$\hat{q}(n) = \frac{\int_0^{T(n)} Q(t)dt}{T(n)}$$



5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

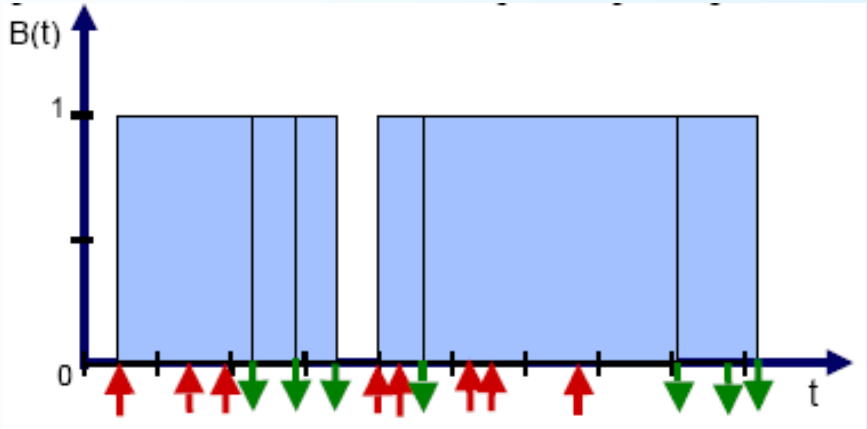
Obtenção de medidas de desempenho:

- **Utilização do servidor:**

  sendo:

  - **u(n): Porcentagem de tempo que o servidor ficou ocupado ao longo da observação de *n* clientes;**
  - **B(t) = 1 se o servidor está ocupado no tempo t;**
    0 se o servidor está livre no tempo t.

$$\hat{u}(n) = \frac{\int_0^{T(n)} B(t)dt}{T(n)}$$



5 – Construção de Simuladores de Eventos Discretos

Obtenção de medidas de desempenho:

- **Exercício:**

  Considere o exemplo de observação de "Entrada de Veículos no Estacionamento". Calcular:

  a) Tempo Médio de Veículos na Fila;

  b) Tempo Médio de Veículos no Sistema;

  c) Número Médio de Veículos na Fila;

  d) Porcentagem de tempo que o Servidor (cancela) ficou ocupado.

6 – Ferramentas de Simulação

Escolha da Ferramenta de Simulação:

Critérios:

- Ferramentas existentes, capacitação da equipe;
- Orçamento e tempo disponíveis.

Alternativas:

- Uso Linguagens e Bibliotecas de Programação;
- Uso de Pacotes de Simulação.

Ponderações:

Ferramentas de simulação	Custo da ferramenta	Custo do desenvolimento da simulação
Linguagens de programação: C, C++, FORTRAN, Java.	Menor	Maior
Pacotes de simulação: Arena, Promode, Comnet, Optnet, etc.	Maior	Menor

6 – Ferramentas de Simulação

Linguagens e Bibliotecas de Programação :

- C, C++, SIMULA, Java, Simlib

Pacotes de Simulação :

- Ferramentas existentes, capacitação da equipe;
- Orçamento e tempo disponíveis.

Alternativas:

- Pacotes de uso geral;
- Pacotes de uso em manufatura;
- Pacotes de uso em Redes de Comunicação de Dados;
- Reengenharia de Processos e Serviços;
- Voltados para um domínio específico: Saúde, Call Center e Animação.

6 – Ferramentas de Simulação

Pacote de Simulação Arena :

- **Características:**
  - Empresa Americana System Modelling (1993)
  - Produto da Empresa Rockwell (1998);
  - Módulos com interfaces GUI para Modelagem e Simulação;
  - Integração com programas que suportam Active-X;
  - Uso da versão Acadêmica.

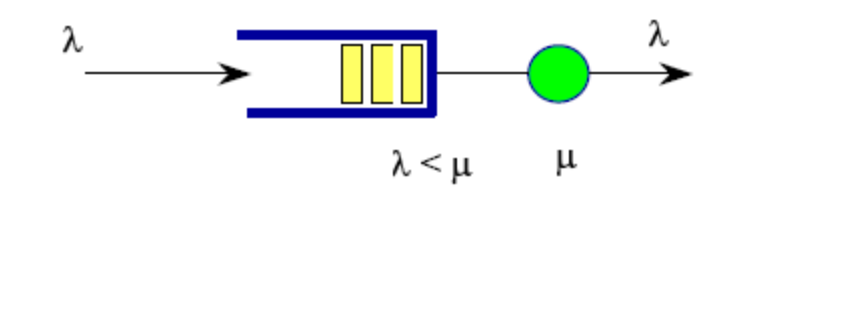
- **Módulos:**
  - Input Analyser: análise estatística dos Parâmetros de Entrada;
  - Output Analyser: análise estatísticas dos Resultados;
  - Arena Viewer: Visualizador da Simulação.

6 - Ferramentas de Simulação: Conceitos de Filas

- **Definição do Modelo de Filas:**
  - **Distribuições: M: exponencial, E: Erlang, D: Determinística e G: Geral.**
  - **Disciplina de Serviço (política de atendimento):**
    - **FCFS - *First Come First Served*;**
    - **RR -(*Round Robin*): fila circular;**
    - **LCFS - *Last Come First Served*;**
    - **LCFS-preenptivo: interrupção do último usuário que chegou;**
    - **PS - *Processor Sharing*: RR com um quantum pequeno associado.**
  - **Centros de Atraso: Sistemas que não possuem atraso (número infinito de Servidores);**
  - **Exemplos: G/G/1/∞/∞/FCFS = G/G/1**

6 - Ferramentas de Simulação: Conceitos de Filas

- **Sistema de Fila:**



Λ: Taxa de chegada;

μ: Taxa de Atendimento.

Condições de estabilidade:

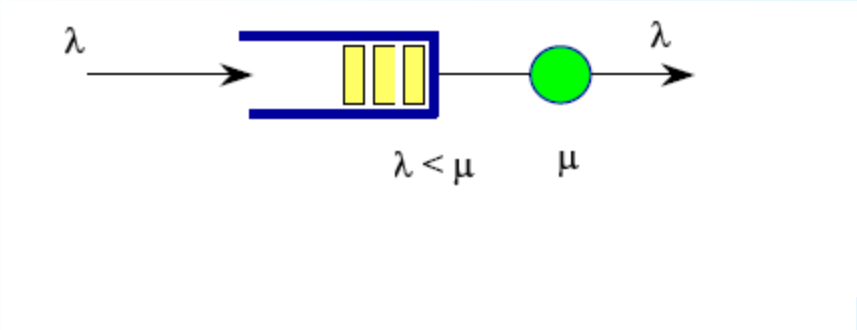
- **Λ < μ**
- **Taxa de chegada = Taxa de saída do sistema**

6 - Ferramentas de Simulação: Conceitos de Filas

- **Exemplo de um sistema de Fila M/M/1:**

Intervalo médio de chegada de clientes ao sistema é de 10 minutos

Tempo médio de atendimento de clientes é de 5 minutos

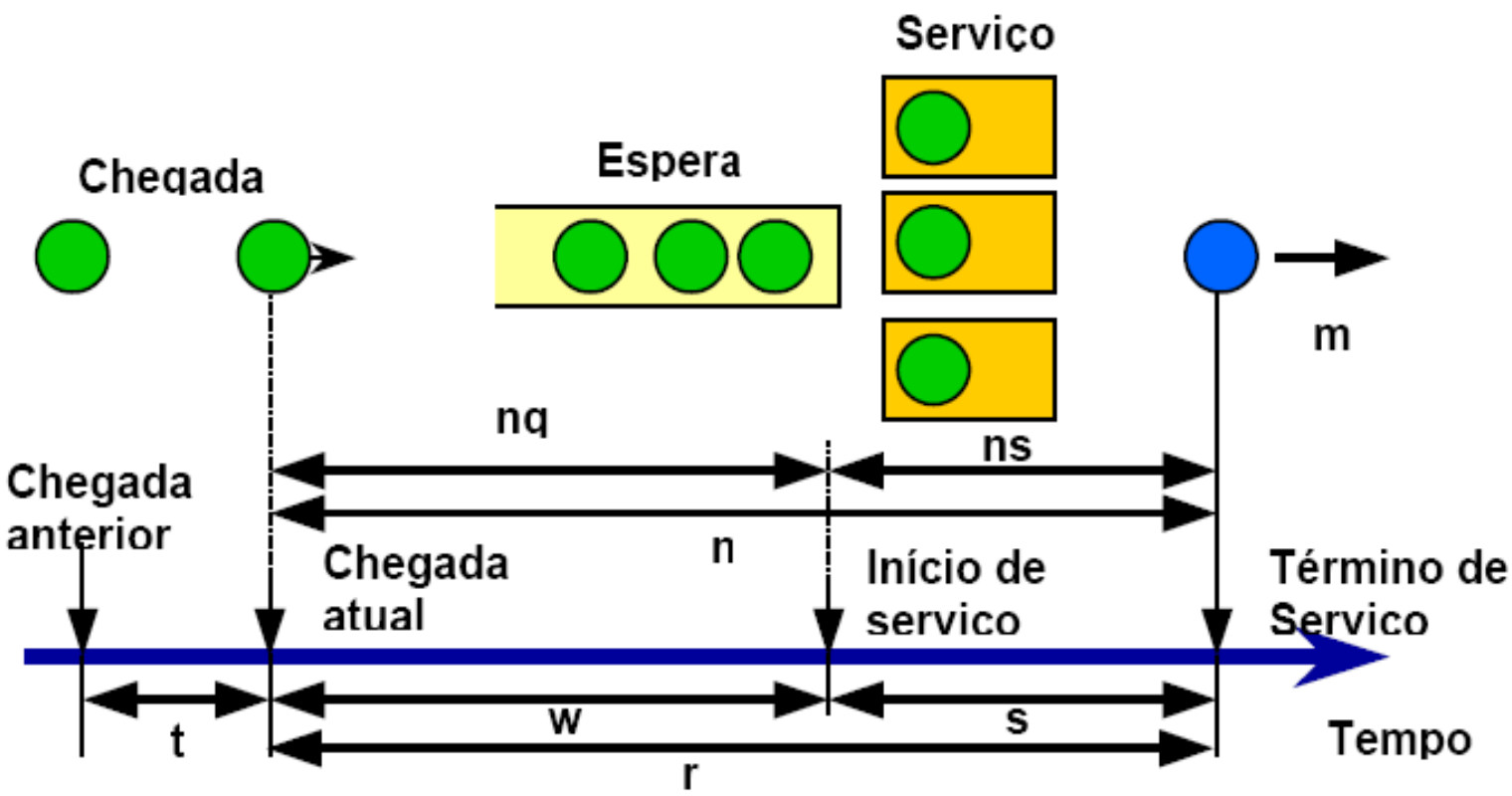


Λ: Taxa de chegada = 1/10 (0,1) clientes/minuto

μ: Taxa de Atendimento = 1/5 (0,2) clientes/minuto

6 - Ferramentas de Simulação : Conceitos de Filas

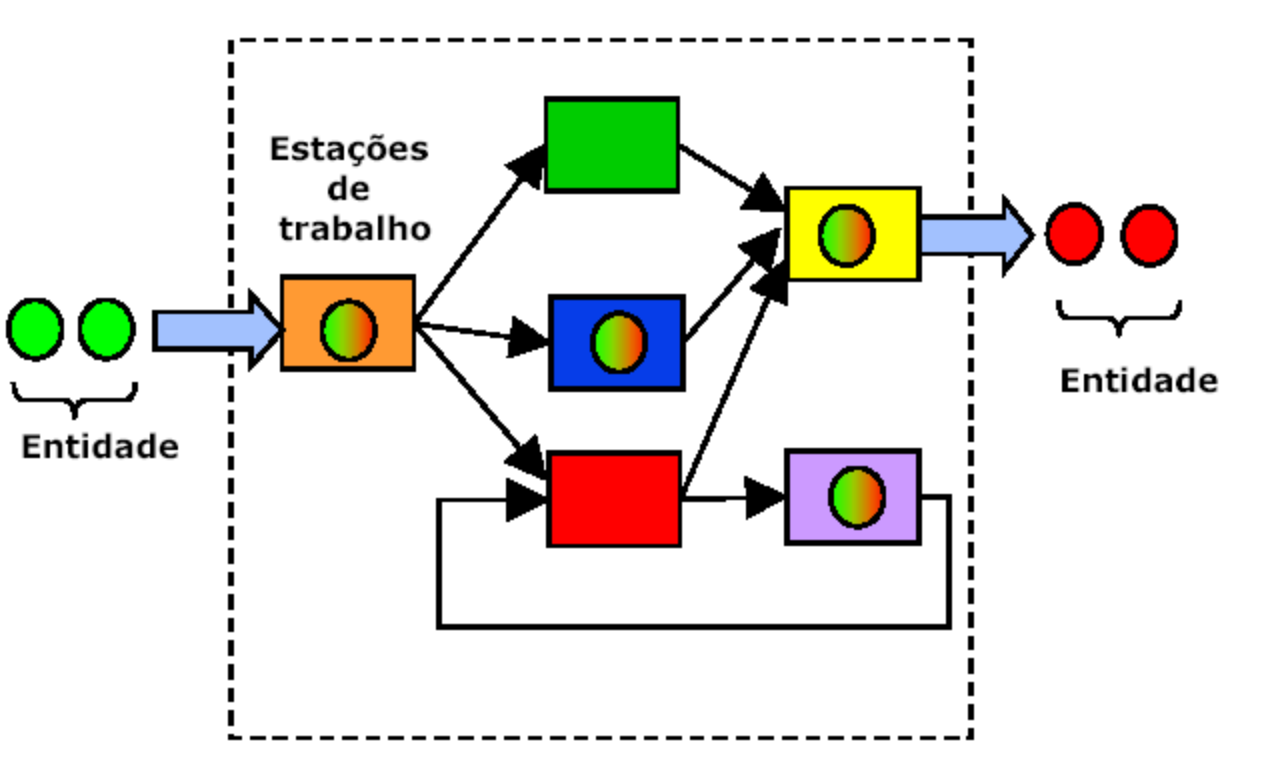
- **Definição do Modelo de Filas:**
  - **Exemplo:**



6 – Ferramentas de Simulação

Pacote de Simulação Arena :

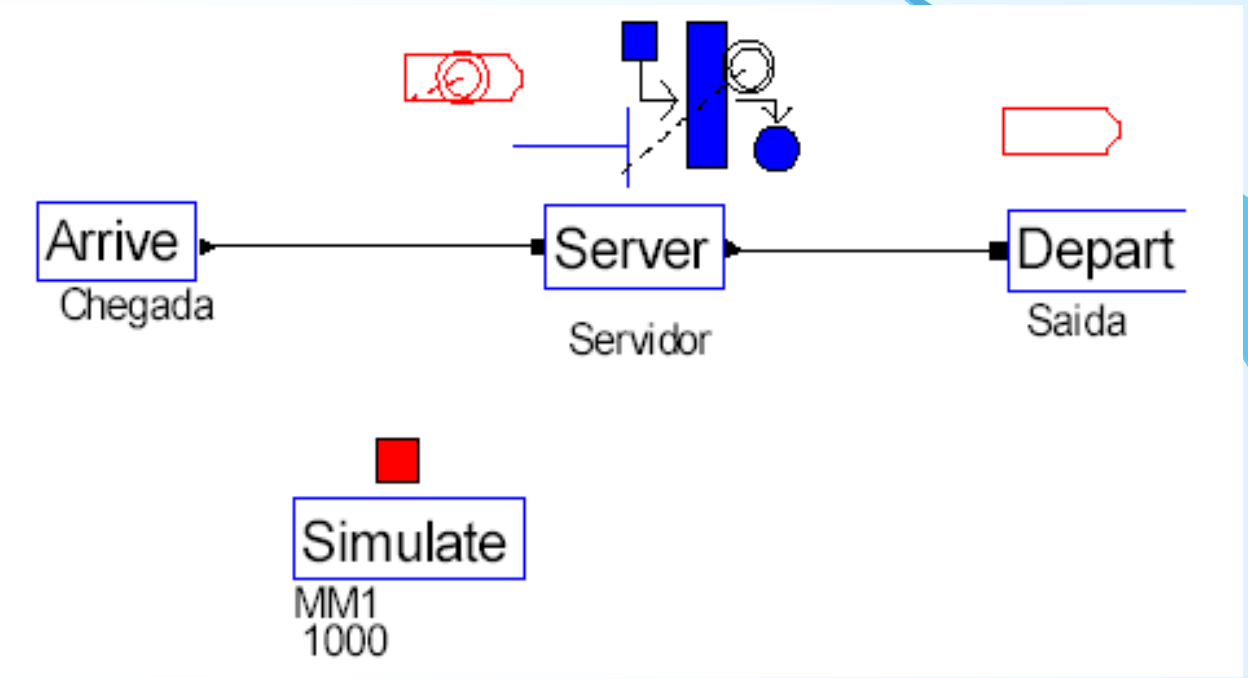
- Elementos da simulação:
  - Entidades;
  - Estações de Trabalho;
  - Fluxo



6 – Ferramentas de Simulação

Pacote de Simulação Arena :

- **Exemplo de um sistema usando Arena (uma fila e um servidor):**



6 – Ferramentas de Simulação

Pacote de Simulação Arena :

- **Ver exemplo de criação do Sistema de Fila: M/M/1 (arquivo: arena.pdf)**
- **Após execução do Modelo, será gerado um relatório:**
  - **Variáveis referentes ao processo de chegada:**

    Taxa de chegada (Λ)

    Intervalo médio de Chegada (IC). Chamado pelo Arena – "Time Betwen Arrivals". Por definição é 1/ Λ

  - **Variáveis referentes a fila:**

    Tempo de permanência na Fila (TF). Chamado pelo Arena – "Waiting Time".

    Número médio de clientes na Fila (NF). Chamado pelo Arena – "Number Waiting"

  - **Variáveis ao Processo de Atendimento:**

    Tempo média de Atendimento (TA). Chamado pelo Arena – "ProcessTime" ou "Delay Time".

    Por definição TA = 1/ μ (onde μ é a taxa de atendimento)

6-Ferramentas de Simulação

Instalação da versão 14 Arena – Windows 7 ou 8:

- **Obter a senha para uso do Arena:** https://www.arenasimulation.com/simulation-software-download
- **Executar: 14.00.00-Arena-DVD\14.00.00-Arena-DVD\Install\Arena\install (em modo "Solucionar problemas de compatibilidade")**

Utilização do Arena

- **Trocar a unidade de tempo (minutos) – Tools/Options**
- **Utilizar símbolos do arena compatível com da apostila: File->template Panel->attach (common.tpo)**

7 – Exercício

Exercício para resolver em duplas.

Implemente em linguagem "C" ou outra linguagem de programação um simulador de Escalonador de Processos de Sistemas Operacionais, de acordo com os algoritmos orientados a eventos (Política de atendimento FIFO, sem prioridade e não preempitivo).

a) Defina as observações de intervalos de chegadas de Processos e de tempo de atendimento de cada um dos clientes (escolher uma função de distribuição de probabilidade)

b) No final da execução, o programa deve apresentar as métricas de desempenho do item 5.

Observação: no dia 06/02 trazer um relatório descrevendo a implementação, código comentado e exemplos de execuções.

Trazer os arquivos fontes e executável para demonstração.

Bibliografia

- ✓ JAIN R. The Art of Computer Systems Performance Analysis, John Wiley & Sons, 1991. Capítulos:24, 26, 27 e 29
- ✓ SOARES, L.F.G. Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas, Ed. Campus.
- ✓ Apostila 4.