

Modelação e Simulação Inteligente

Modelos e Tipos de Simulação

Paulo Matos

P.PORTO

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

INFORMÁTICA

© DEI/ISEP

1

Disclaimer

Materiais e Slides

- Materiais/slides são adaptados dos slides criados pela prof. Isabel Praça

2023/24

MODSS

2

© DEI/ISEP

2

Resumo

- Sistemas e Modelos
- Tipos de Modelos
- Simulação Contínua vs Discreta
- Simulação Discreta
 - Entidades, Atividades, Eventos
 - Mecanismo de avanço temporal
 - Conceção e Criação do Modelo
 - Estrutura de um Simulador
- Simulação Contínua/Discreta combinada

Sistemas e Modelos

- Sistema
 - Todo e qualquer objeto sobre o qual se pretende realizar um estudo
- Modelo
 - Representação do objeto sobre a qual se irá, efetivamente, executar o estudo

Sistemas e Modelos

Experimentação sobre o próprio sistema:

- Estimulando-o de forma apropriada, registando as alterações observadas nos seus parâmetros
- Fiabilidade nos resultados obtidos
- Aplicabilidade:
 - Laboratórios de química, de física, de biologia

Sistemas e Modelos

Experimentação sobre o próprio sistema:

- Acesso ao objeto de estudo
- Nem sempre é viável
 - Impossibilidade de aceder diretamente ao sistema
 - Custo elevado
 - Impossibilidade de repor o estado do sistema
 - Sistema (ainda) não existe
- Etc.

Sistemas e Modelos

Modelo

- Um Modelo permite experimentar sem interferir com a realidade!
- Introduz fonte de incertezas
- Grau de precisão com que representa o sistema
- Incerteza admissível associada aos resultados da experiência
- Criação do Modelo é uma tarefa crítica
 - Pode consumir bastante tempo
 - Estabelecer grau de precisão adequado

2023/24

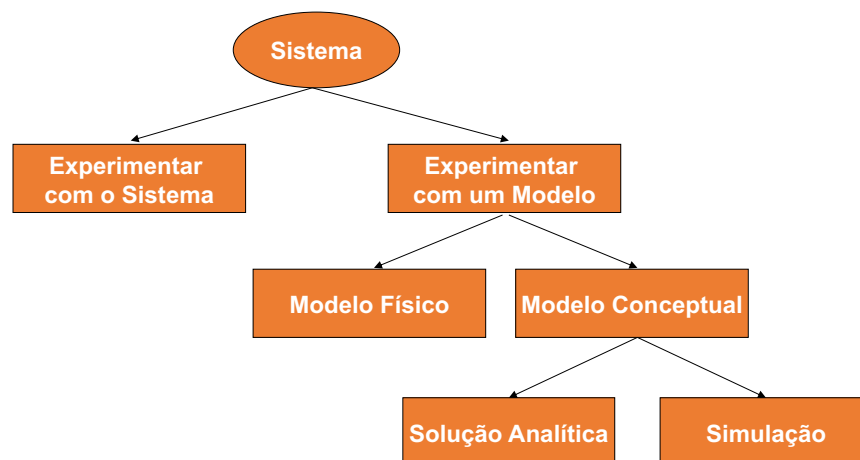
MODSS

7

© DEI/ISEP

7

Sistemas e Modelos



2023/24

MODSS

8

© DEI/ISEP

8

Sistemas e Modelos

Modelos físicos

- O sistema é substituído por uma versão à escala do próprio sistema, i.e., é criada uma espécie de maquete sobre a qual as experiências serão realizadas
- Simular o comportamento de grandes estruturas, como pontes, barragens, turbinas, aviões

Sistemas e Modelos

Modelos conceptuais

- O sistema é substituído por uma versão conceptual do seu funcionamento, i.e., por um determinado conjunto de equações matemáticas ou relações funcionais de causa-efeito

Sistemas e Modelos

Modelos conceptuais

- Vantagem face aos modelos à escala
 - Simplifica o transporte e manuseamento do modelo
 - Mais versáteis, permitindo mais facilmente alterações à sua estrutura
- Facilmente implementáveis em computador
 - Elevada capacidade de armazenamento de dados e o excelente poder de cálculo, trouxe à simulação uma expressão de topo nos atuais métodos de previsão

2023/24

MODSS

11

© DEI/ISEP

11

Sistemas e Modelos

- Simulação
 - Modelos conceptuais
 - Modelos estáticos vs dinâmicos
 - Modelos determinísticos vs probabilísticos
 - Modelos contínuos vs discretos

2023/24

MODSS

12

© DEI/ISEP

12

Sistemas e Modelos

Modelos estáticos vs dinâmicos

- Modelos estáticos representam um sistema num determinado instante, ou sistemas que não são afetados pela passagem do tempo
- Modelos dinâmicos representam a evolução do sistema ao longo do tempo

Sistemas e Modelos

Modelos determinísticos vs probabilísticos

- Simulação probabilística não opera sobre um modelo descritivo do sistema, mas sim sobre um conjunto de funções de probabilidade que ilustram a forma como o sistema responde
- Não é necessário modelar os processos que se desenrolam no interior do sistema, mas unicamente conhecer as suas entradas ou saídas, ou ambas

Sistemas e Modelos

Modelos determinísticos vs probabilísticos

- Modelos determinísticos não contemplam aspetos aleatórios
- Simulação probabilística produz resultados eles próprios aleatórios, que devem ser encarados como uma estimativa das verdadeiras características do sistema

2023/24

MODSS

15

© DEI/ISEP

15

Sistemas e Modelos

Simulação probabilística

Exemplo: Sistema composto por um dado de póquer

- Simulação contínua
 - Escrita das equações que regem o movimento de um sólido, dados como parâmetros a velocidade inicial, o ângulo com que é atirado, o atrito oferecido pela mesa, etc.
- Simulação estatística
 - Função da distribuição de probabilidade de, num dado lance, sair uma determinada face

2023/24

MODSS

16

© DEI/ISEP

16

Sistemas e Modelos

Simulação probabilística

Exemplo: Sistema composto por DOIS dados de póquer

- É fácil inferir, através de manipulações matemáticas, relativamente simples, a probabilidade de no conjunto dos dois dados se obter uma qualquer combinação de saídas
- Este tipo de simulação recebe muitas vezes a designação de Simulação de Monte Carlo (essencialmente estática)
- Técnica largamente utilizada em análise de risco, física das partículas, cadeias de distribuição e, em geral, em sistemas complexos que inviabilizam a criação de um modelo dinâmico fiável

2023/24

MODSS

17

© DEI/ISEP

17

Sistemas e Modelos

Modelos contínuos vs discretos

- **Modelo contínuo**
 - O estado do sistema varia continuamente com a variável independente
- **Modelo discreto**
 - O sistema apenas se pode encontrar num número finito de estados, mudando instantaneamente de um estado para outro
- Sistemas contínuos, podem, por vezes, ser substituídos por versão “discretizada” sem grande prejuízo para a fiabilidade dos resultados obtidos

2023/24

MODSS

18

© DEI/ISEP

18

Simulação Contínua

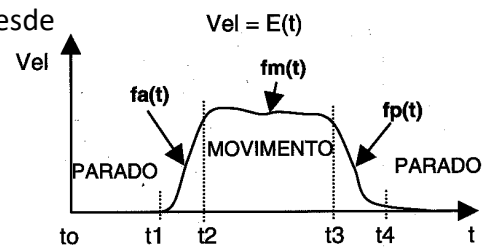
- Num modelo de simulação contínua o estado (Y) do sistema depende continuamente da variável independente (x), sendo essa relação expressa por equações, muitas vezes diferenciais

- $Y = E(x)$

- Exemplo: simulação da velocidade de um autocarro, desde que inicia o movimento até que para novamente

- Sistema – autocarro
- Estado do Sistema – velocidade
- Variável independente - tempo

$$E(t) = \begin{cases} 0, & t_0 < t < t_1 \\ fa(t), & t_1 < t < t_2 \\ fm(t), & t_2 < t < t_3 \\ fp(t), & t_3 < t < t_4 \end{cases}$$



2023/24

MODSS

19

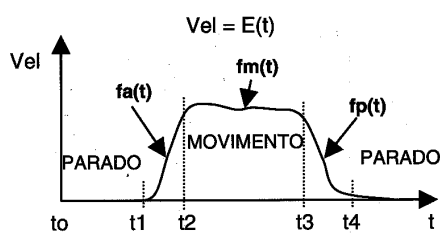
© DEI/ISEP

19

Simulação Discreta

Aplica-se a:

- Sistemas cujos estados se possam considerar discretos, ou seja, variam de forma discreta ao longo do intervalo de valores da variável independente
- Sistemas contínuos que, de alguma forma, permitam a “discretização” dos seus estados



2023/24

MODSS

20

© DEI/ISEP

20

Simulação Discreta

Identificar e descrever os elementos que, do ponto de vista funcional, caracterizam e são os responsáveis pela dinâmica do sistema

- **Entidades**
 - Elementos responsáveis por desenvolverem atividades no sistema
- **Atividades**
 - Ações através das quais as entidades promovem as mudanças de estados

Simulação Discreta

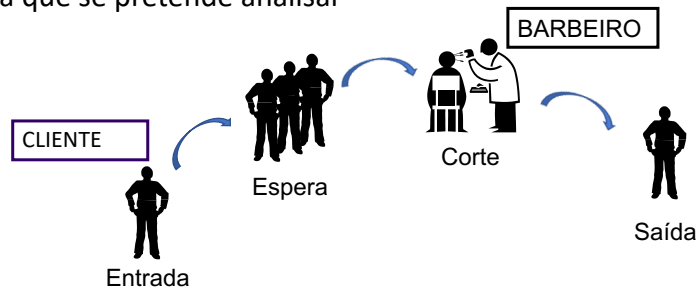
Identificar e descrever os elementos que, do ponto de vista funcional, caracterizam e são os responsáveis pela dinâmica do sistema

- **Eventos**
 - As atividades ao começarem ou terminarem dão origem a Eventos
- **Filas de Entidades**
 - Entidades, enquanto esperam por condições para desenvolverem as suas atividades, esperam em filas de Entidades ou Filas de Espera

Simulação Discreta

Entidades

- Qualquer elemento capaz de contribuir para o conjunto de estados do sistema
- Analista deve começar por identificar as entidades **relevantes** envolvidas no sistema que se pretende analisar



2023/24

MODSS

23

© DEI/ISEP

23

Simulação Discreta

Classificação de Entidades

- Operações que podem realizar
 - Ativas – responsáveis por gerar transições nos estados do sistema
 - Passivas – só alteram o seu estado por intermédio de ações de outras entidades
- Permanência no Sistema
 - Permanentes – permanecem no sistema durante todo o processo de simulação
 - Temporárias – entram no sistema, são processadas e, provavelmente, abandonam o sistema

Atributos das Entidades

- Propriedades características da entidade

2023/24

MODSS

24

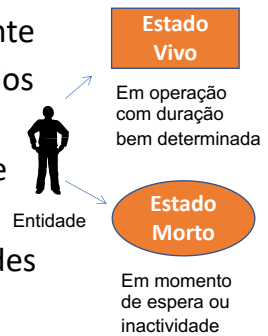
© DEI/ISEP

24

Simulação Discreta

Atividade

- Operação ou procedimento iniciado em cada instante relevante do sistema, sendo através delas que se transformam os estados das entidades
- Elemento da simulação discreta que aglomera regras de onde emerge a dinâmica do sistema
- Corresponde a um estado dinâmico de uma ou várias entidades
 - Atividades Vivas – associadas a um estado do sistema com uma operação de duração bem definida
 - Atividades Mortas – associadas a estados em que a entidade se encontra à espera que algo aconteça



2023/24

MODSS

25

© DEI/ISEP

25

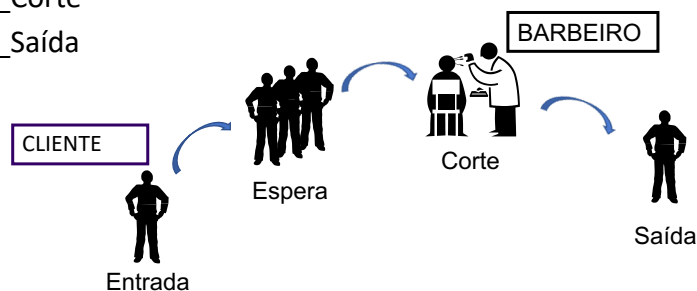
Simulação Discreta

Cliente

- Cliente_Entrada
- Cliente_Espera
- Cliente_Corte
- Cliente_Saída

Barbeiro

- Barbeiro_Livre
- Barbeiro_Corte



2023/24

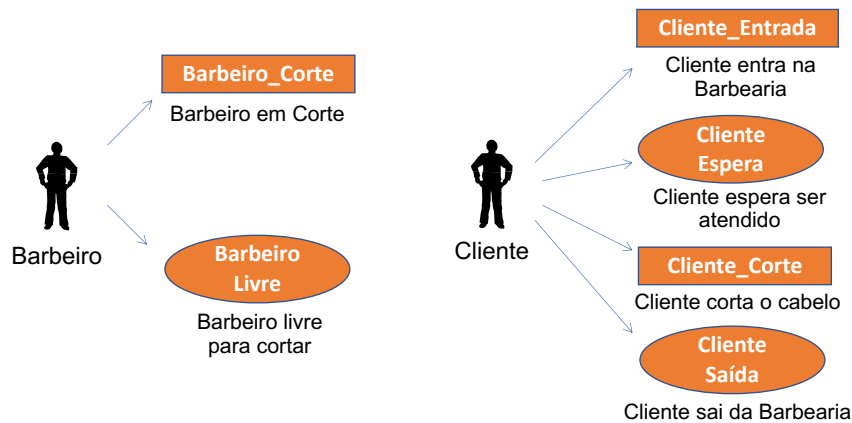
MODSS

26

© DEI/ISEP

26

Simulação Discreta



**O sistema evolui ao longo das atividades das suas entidades.
As entidades interagem através de atividades comuns.**

2023/24

27

© DEI/ISEP

27

Simulação Discreta

Evento

- Acontece num determinado instante, isto é, representa uma transição do sistema
- Surge sempre que se verifica uma mudança de estado no sistema, provocada pela ação associada ao mesmo
 - Sistema mantém-se no mesmo estado até ao próximo evento
 - Sistema evolui de evento em evento

**Atividades e eventos são duas perspectivas diferentes
mas equivalentes de descrever a dinâmica de um sistema**

2023/24

MODSS

28

© DEI/ISEP

28

Simulação Discreta

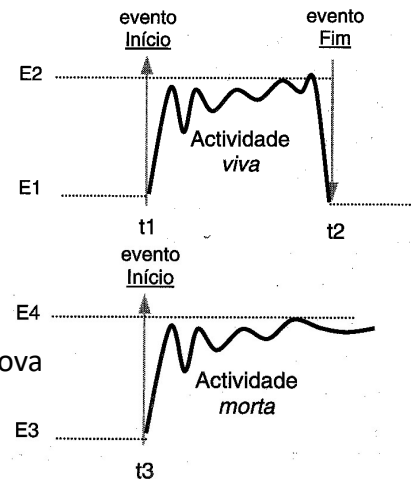
Eventos

- **Atividades vivas**

- Representar por dois eventos: evento de início e evento de fim

- **Atividades mortas**

- Representar por evento de início
- Atividade morta termina quando se inicia uma nova atividade viva



2023/24

MODSS

29

© DEI/ISEP

29

Simulação Discreta

Eventos

- Endógenos – provocados pelo funcionamento dos mecanismos internos ao próprio sistema
- Exógenos – derivados de acontecimentos que representam comunicação com o exterior

Eventos vs Atividades

- Escola de simulação baseada em atividades, interessada em acompanhar o sistema no interior dos processos de transição de estados
- Escola de simulação baseada em eventos, interessada na perspetiva das ações associadas às transições

2023/24

MODSS

30

© DEI/ISEP

30

Simulação Discreta

Filas de Entidades ou Filas de Espera

- Locais onde as entidades aguardam pelo início de uma determinada atividade (*viva*)
- Tipicamente usadas para modelar os estados *mortos* ou estados de espera

2023/24

MODSS

31

© DEI/ISEP

31

Simulação Discreta

Ciclos de Atividades

- Cada entidade possui um ciclo próprio de atividade, através do qual é representado o modo como essa entidade se divide entre as suas atividades elementares
- Descreve a forma como as atividades elementares se relacionam entre si
- Habitualmente atividades vivas aparecem a alternar com atividades mortas

2023/24

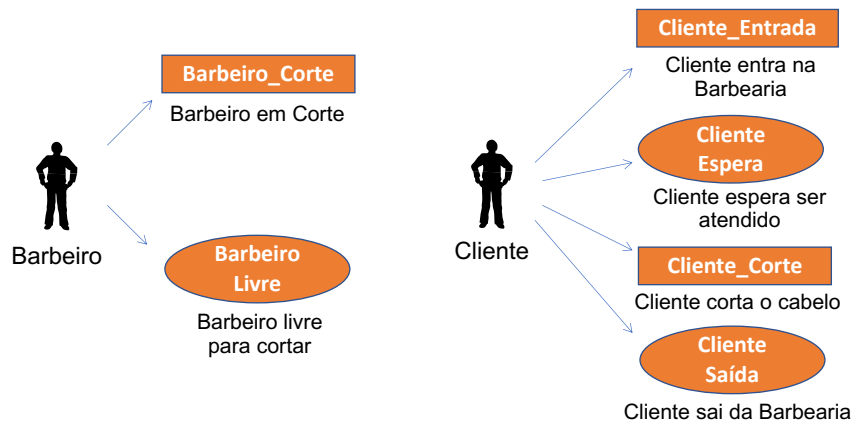
MODSS

32

© DEI/ISEP

32

Simulação Discreta



2023/24

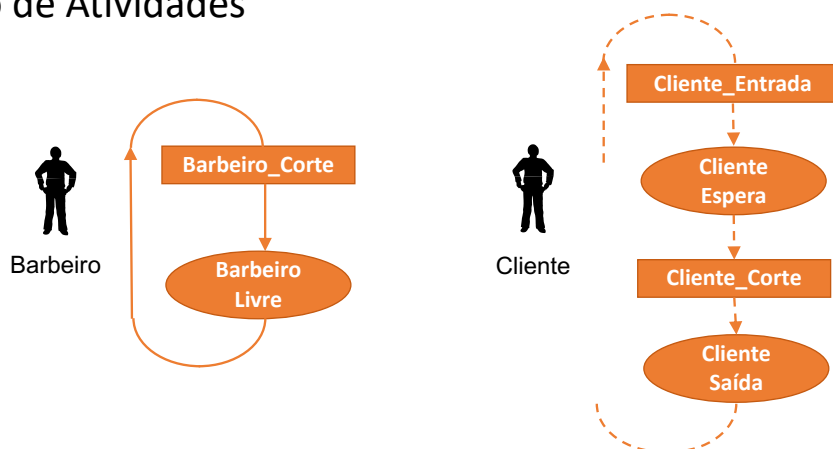
33

© DEI/ISEP

33

Simulação Discreta

• Ciclo de Atividades



2023/24

MODSS

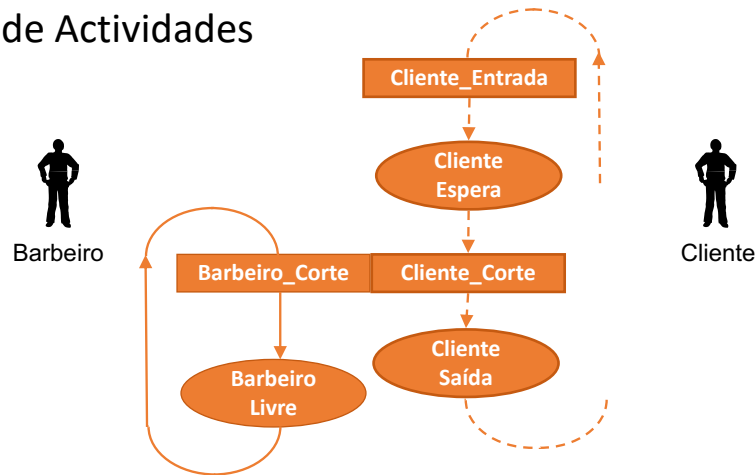
34

© DEI/ISEP

34

Simulação Discreta

• Ciclo de Actividades



2023/24

MODSS

35

© DEI/ISEP

35

Simulação Discreta

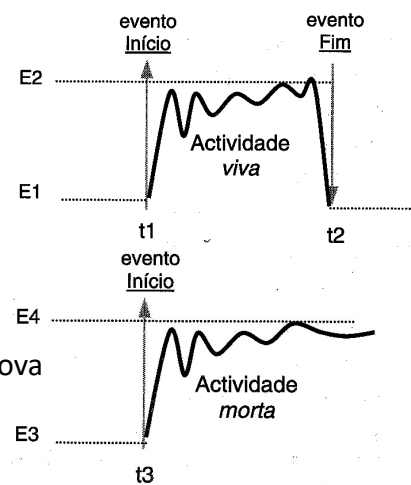
Eventos

• Actividades vivas

- Representar por dois eventos: evento de início e evento de fim

• Actividades mortas

- Representar por evento de início
- Actividade morta termina quando se inicia uma nova actividade viva



2023/24

MODSS

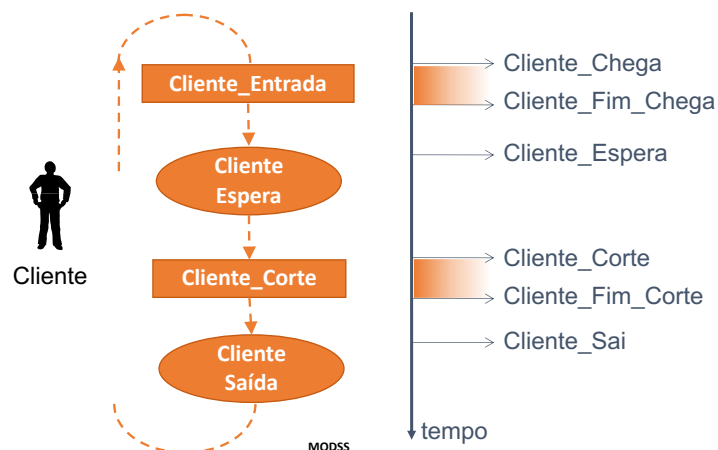
36

© DEI/ISEP

36

Simulação Discreta

Ciclo de Atividades e Encadeamento de Eventos



2023/24

MODSS

37

© DEI/ISEP

37

Simulação Discreta

Eventos relevantes

- Cliente_Chega
- Cliente_Fim_Chega
- Cliente_Corte
- Cliente_Fim_Corte

Eventos “a ignorar”

- Cliente_Espera
 - Acontece no mesmo instante do evento Cliente_Fim_Chega
- Cliente_Sai
 - Acontece no mesmo instante do evento Cliente_Fim_corte

2023/24

MODSS

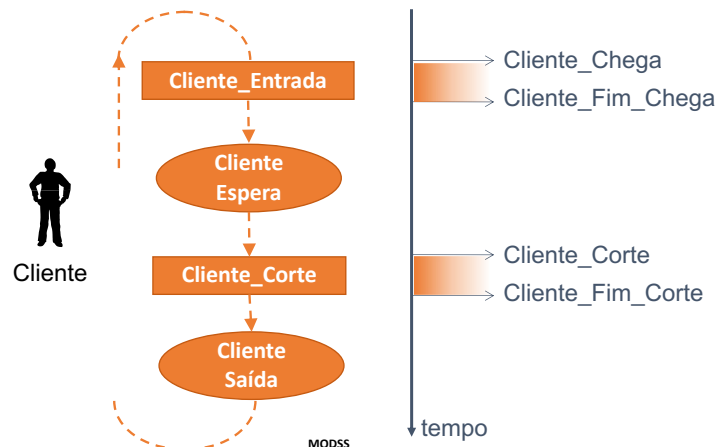
38

© DEI/ISEP

38

Simulação Discreta

Ciclo de Atividades e Encadeamento de Eventos



2023/24

MODSS

39

© DEI/ISEP

39

Simulação Discreta

Técnicas de Avanço

- Fazer evoluir o sistema ao longo de um parâmetro considerado a variável independente

Técnicas de Avanço no Tempo

- Variável independente é o tempo
- Avanço Regular (*Time Slicing*)
- Avanço para Próximo Evento (*Next Event*)

2023/24

MODSS

40

© DEI/ISEP

40

Simulação Discreta

Avanço Regular (*Time Slicing*)

- Observar o estado do sistema através de amostragens sucessivas em intervalos de tempo regulares
 - Relógio da simulação avança em incrementos de Δt unidades de tempo
- Independência entre o processo de amostragem e as transições de estado do sistema



2023/24

MODSS

41

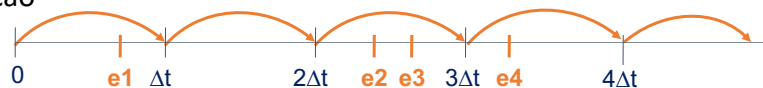
© DEI/ISEP

41

Simulação Discreta

Avanço Regular (*Time Slicing*)

- Limitações
 - Erro introduzido ao processar os eventos no final do intervalo em que ocorreram
 - Necessidade de decidir que evento processar primeiro, quando são tratados como simultâneos eventos que na realidade não o são
 - Recolha de amostras do mesmo estado, tratando-se de estados de longa duração



2023/24

MODSS

42

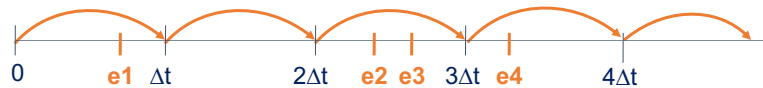
© DEI/ISEP

42

Simulação Discreta

Avanço Regular (*Time Slicing*)

- Diminuir Δt
 - Torna o erro de amostragem mais pequeno
 - Existe uma frequência mínima de amostragem (lei de Nyquist), necessária para que o fenómeno possa ser representado pelas amostras
 - Aumenta o tempo de execução (e de análise de estados sem alteração)



2023/24

MODSS

43

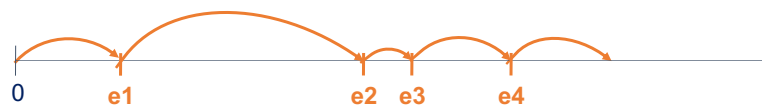
© DEI/ISEP

43

Simulação Discreta

Avanço para Próximo Evento (*Next Event*)

- O tempo da simulação avança de evento em evento
- Técnica adaptativa que permite reduzir ao mínimo a quantidade de amostras recolhidas na simulação
- Perfeito sincronismo do processo de avanço de tempo, ou seja, da sequência de amostragem, com a sequência das transições de estado



2023/24

MODSS

44

© DEI/ISEP

44

Simulação Discreta

Avanço para Próximo Evento (*Next Event*)

- Cada vez que ocorre um evento, é necessário determinar qual o instante em que surgirá o próximo evento
- Exige a implementação de um mecanismo de marcação e memorização de eventos futuros
 - Implementar, por exemplo, usando uma lista de eventos...
- **Vantagens**
 - Permite a eliminação de amostras supérfluas
 - Perfeito sincronismo entre cada amostragem e cada transição de estado do sistema
 - Não introduz erros de incerteza relacionados com a escala de tempo

2023/24

MODSS

45

© DEI/ISEP

45

Simulação Discreta

Conceção e criação do modelo

- Abordagens equivalentes que não passam de formas diferentes de implementar o diagrama de estados de um sistema
 - Atividades
 - Eventos
 - Processos
- Três Fases

2023/24

MODSS

46

© DEI/ISEP

46

Simulação Discreta

Estrutura de um Simulador

- Bloco Executivo (Motor da Simulação)
 - Motor controlador do simulador, responsável pelo controlo do tempo e pelo sequenciamento das operações a serem executadas durante a simulação
- Bloco das Operações
 - Contém a descrição do modelo em termos de rotinas de programação nas quais serão definidas as sequências de interação entre as várias entidades no sistema

2023/24

MODSS

47

© DEI/ISEP

47

Simulação Discreta

Estrutura de um Simulador

- Bloco de Utilidades
 - Inclui rotinas de interesse genérico, usadas pelo analista como ferramentas de apoio à simulação
 - Rotinas de cálculo de números aleatórios, de distribuições estatísticas, de apresentação de resultados, etc.

2023/24

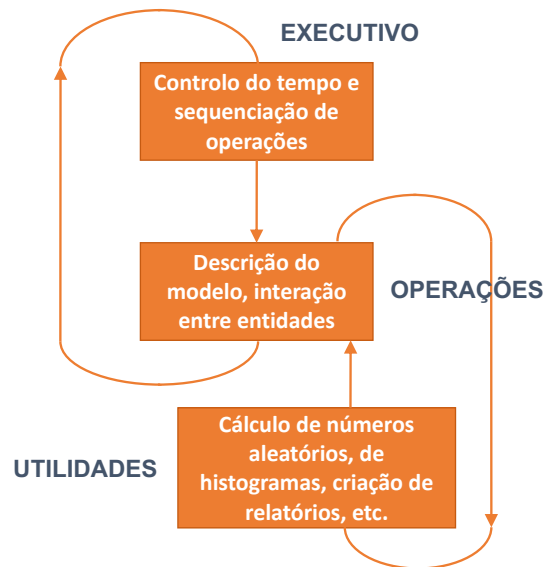
MODSS

48

© DEI/ISEP

48

Simulação Discreta



2023/24

MODSS

49

© DEI/ISEP

49

Simulação Discreta – Contínua Combinada

- Alguns sistemas não são completamente discretos, nem completamente contínuos
- Três tipos fundamentais de interação
 - Um evento pode provocar a mudança no valor de uma variável contínua
 - Um evento pode alterar a relação entre uma variável contínua e a variável independente (por exemplo, o tempo)
 - Uma variável contínua pode, ao atingir um determinado valor, esboletar a ocorrência de um evento (evento de estado)

2023/24

MODSS

50

© DEI/ISEP

50

Simulação Discreta – Contínua Combinada

Exemplo

“Tankers carrying crude oil arrive at a single unloading dock, supplying a storage tank that in turn feeds a refinery through a pipeline. An unloading tanker delivers oil to the storage tank at a specified constant rate (tankers that arrive when the dock is busy form a queue). The storage tank supplies oil to the refinery at a different specified rate. The dock is open from 6 a.m. to midnight, and, because of safety considerations, unloading of tankers ceases when the dock is closed. ...”

2023/24

MODSS

51

© DEI/ISEP

51

Simulação Discreta – Contínua Combinada

Exemplo (continuação)

“Unloading the tanker is considered complete when the level of oil in the tanker is less than 5% of its capacity, but unloading must be temporarily stopped if the level of oil in the tank reaches its capacity. Unloading can be resumed when the level of oil in the tank decreases to 80% of its capacity. If the level of oil in the tank ever falls below 5000 barrels, the refinery must be shut down temporarily. In order to avoid frequent startups and shutdowns of the refinery, the tank does not resume supplying oil to the refinery until the tank once again contains 50000 barrels.”

2023/24

MODSS

52

© DEI/ISEP

52

Modelação e Simulação Inteligente

Modelos e Tipos de Simulação

Paulo Matos

P.PORTO

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

INFORMÁTICA

© DEI/ISEP

53

Outros Temas para o Trabalho

- Simulação de robots
- Simulação do Comportamento Humano na interação Homem – Máquina
- Simulação de redes e ciber-ataques
- Co-Simulação
- Digital Twins
- Simulação Multi-Agente
- Simulação de smart homes/cities

2023/24

MODSS

54

© DEI/ISEP

54