

4/98



Universidade Técnica de Lisboa
INSTITUTO SUPERIOR DE ECONOMIA E GESTÃO



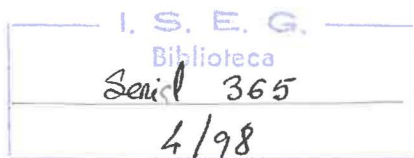
CADERNOS DE ECONÓMICAS

DOCUMENTO DE TRABALHO Nº 4/98

**A UTILIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO EM
PRODUÇÃO E OPERAÇÕES**

ALBERTO FERREIRA PEREIRA

DEPARTAMENTO DE GESTÃO



A Utilização da Simulação em Produção e Operações

Alberto A. Ferreira Pereira *

Resumo

Apesar da sua grande utilidade no estudo de sistemas complexos, nomeadamente na gestão da produção e das operações, a simulação não constitui tópico de importância em muitos programas de estudos universitários. A complexidade de grande número de sistemas de produção impede que no seu estudo e avaliação se apliquem modelos de optimização que permitem calcular os valores para as variáveis relevantes de forma a optimizar alguma medida de desempenho. O recurso à simulação surge assim como uma excelente alternativa. A simulação é amplamente utilizada na gestão da produção e das operações na indústria e em muitas outras áreas tão diversificadas como os sistemas de transportes e de gestão de tráfego; de programação da produção; de planeamento e controlo de projectos; de planeamento financeiro; em estudos ambientais e ecológicos e em sistemas de cuidados médicos. Com o recurso a um exemplo simples ilustramos o conceito de simulação e descrevemos as três principais abordagens frequentemente utilizadas em simulação.

Palavras-chave: evento, gestão da produção, simulação, simulação discreta, sistema, processo.

* Professor Associado, Departamento de Gestão do Instituto Superior de Economia e Gestão

Introdução

No estudo da gestão da produção e das operações, toma-se conhecimento de modelos e técnicas frequentemente utilizadas na determinação de valores cuja interpretação é imprescindível ao processo de tomada de decisão. De entre os mais populares daqueles e destas destacam-se os modelos, determinísticos e estocásticos, para determinação de quantidades económicas de encomenda ou de fabrico e de stocks de segurança; os modelos para determinação de medidas de desempenho de filas de espera; as técnicas de sequenciamento com vista à optimização de uma determinada variável; os modelos e técnicas para determinação do caminho crítico de um projecto ou ainda os modelos para determinar a melhor maneira de afectar recursos diversos para configurar um mix óptimo de produção com vista a satisfazer uma procura conhecida. Uma vez consolidado o entendimento destes modelos e técnicas, a aprendizagem envereda por caminhos mais complexos onde se questionam alguns dos seus pressupostos e se discute a adequabilidade dos mesmos para descrever a realidade ou para nos conferir a capacidade de a antever. Nesta progressão do simples para o complexo, deparamo-nos, por vezes, com situações intratáveis para as quais não dispomos de instrumentos analíticos suficientemente poderosos para abarcar a complexidade que se pretende estudar. Recorremos então a procedimentos heurísticos [Iwata *et al.*, 1982; Shanker e Tzen, 1985; Doulgeri, Hibberd e Husband, 1987] ou à simulação.

Salvo raríssimas excepções, nos programas universitários de licenciatura em Portugal não se ensina simulação. E são muito poucos os programas de estudos pós licenciatura onde tal ocorre. Os programas de estudos de licenciatura de duas das mais importantes escolas superiores de gestão não contêm tópicos sobre simulação. Estima-se que não existe sequer uma escola superior onde o estudante de licenciatura desfrute da possibilidade de *simular* num computador um sistema de produção ou de distribuição para conhecer as variações de comportamento funcional, de rendimento e outras alterações simples ou simultâneas de parâmetros caracterizadores do sistema. Neste artigo propomo-nos discorrer sobre o que é a simulação e sobre a sua importância para o estudo da produção e das operações.



Simulação

De uma forma simples diz-se que um modelo de simulação é um conjunto de funções matemáticas, distribuições probabilísticas e regras de decisão que replicam a forma como um sistema se comporta sob certas condições específicas. Este modelo é, assim, descritivo distinguindo-se dos modelos de optimização que permitem calcular os valores para as variáveis relevantes de forma a otimizar alguma medida de desempenho do sistema. Descrever constitui, juntamente com a explicação e o teste, o conjunto das fases constitutivas do ciclo de investigação [Meredith *et al.* 1989].

A investigação descritiva visa reportar elementos de situações e eventos. Era fundamentalmente descritiva a natureza das actividades conduzidas nos primórdios da investigação na área das operações. O resultado é uma caracterização bastante bem documentada do assunto de interesse. Esta caracterização pode depois ser utilizada para gerar ou testar teorias, enquadramentos e conceitos a respeito da situação. Meredith [1984], por exemplo, descreve as complicações surgidas no processo simples de aquisição de uma máquina fotocopiadora para um departamento universitário e Heller [1951] descreve as decisões de investimento de uma forma genérica. Um nível mais pormenorizado de descrição acerca de uma faceta particular do assunto pode requerer aquilo a que algumas vezes se designa por investigação exploratória. Aqui, investiga-se um aspecto particular com mais profundidade baseado no entendimento proporcionado pela investigação descritiva preliminar. O resultado da investigação exploratória é uma descrição mais pormenorizada que pode conduzir a um entendimento mais profundo. Constituem exemplos de áreas onde há necessidade de descrição mais realista os sistemas de controlo fabris, o MRP (Materials Requirements Planning), as novas tecnologias de produção, os problemas operacionais relacionados com novas tecnologias e sistemas e mesmo o processo organizacional de tomada de decisão com relação à adopção dos novos imperativos operacionais como o JIT (Just In Time), TQC (Total Quality Control), FMS (Flexible Manufacturing System) e CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Em estudos de gestão da produção e das operações é frequente o recurso à simulação. Steck e Solberg [1981] corroboram a inexequibilidade de metodologias analíticas para abordar problemas de carregamento e de escalonamento dada a complexidade de inúmeros aspectos do sistema. Estes autores recorreram à simulação determinística para estudar estratégias alternativas de carregamento e escalonamento

para a Caterpillar Tractor Company em Peoria, Illinois. Na altura em que tal estudo foi realizado este sistema de produção flexível era considerado um dos maiores e mais complexos existentes.

Dada a complexidade envolvida na programação matemática, Shanker e Tzen [1985] consideraram a simulação como o instrumento adequado para o problema de escalonamento completo, isto é, o problema conjunto de carregamento e escalonamento.

Wang [1986] simulou três hipotéticos sistemas de produção flexível para desenvolver uma ferramenta que permitisse prever o desempenho do sistema para condições operacionais diferentes e verificar como estes factores contribuíam para o desempenho do sistema. Para a avaliação do desempenho do sistema em relação ao volume de output utilizou um programa de simulação escrito em GPSS.

Denzler e Boe [1987] abordaram o problema de como sequenciar partes na dupla perspectiva de entrada no sistema de produção e de sequenciamento de máquina para máquina em ordem a completar todas as partes no mais curto *makespan* possível para um sistema de produção flexível com J centros de máquinas e com o requisito para produzir uma dada quantidade Q_k de partes diferentes. Desenharam de forma específica uma experiência para simular a eficácia de seis heurísticas de sequenciamento para carregar um sistema de produção flexível quando sujeito a diferentes condições de disponibilidade de paletes e de flexibilidade de máquinas.

Ozden [1988] investigou o efeito combinado de alguns parâmetros na totalidade do desempenho de um sistema de produção flexível através de um conjunto de experiências de simulação codificado em LISP (GCLISP) para um computador pessoal IBM XT.

Pereira [1990] recorreu igualmente a simulação digital (SLAM) para avaliar o desempenho de um sistema de produção flexível dedicado operando sob 36 configurações diferentes com respeito a duas medidas de desempenho: *flowtime* e utilização de veículos. Avaliou três regras de sequenciamento, três diferentes níveis de disponibilidades de veículos guiados automatizados e dois níveis de comunalidade de máquinas.

Simular engloba o processo de construção do modelo e o desenho e implementação de uma experiência adequada envolvendo aquele modelo. As experiências estatísticas ou simulações feitas ac modelo representativo de um sistema,

permitem diversas inferências: (a) sem necessidade de os construir se se tratam apenas de propostas de sistemas; (b) sem provocar qualquer perturbação se se tratam de sistemas em funcionamento e cuja experimentação se revela demasiado cara ou pouco segura e, finalmente, (c) sem ter de os destruir se o objecto da experiência é a determinação dos seus limites de *stress*. Desta forma, os modelos de simulação podem ser utilizados para concepção e design, análise de procedimentos e avaliação de desempenho.

Assume-se que na construção de modelos de simulação podemos descrever um sistema em termos inteligíveis por um computador. O conceito de *descrição do estado do sistema* assume aqui uma importância relevante. Se um sistema pode ser caracterizado por um conjunto de variáveis com cada combinação de valores das variáveis representando um estado ou condição única do sistema, então a manipulação dos valores das variáveis simula o movimento do sistema de um estado para outro. A experiência em simulação consiste assim em observar o comportamento dinâmico do modelo que se altera de estado para estado de acordo com regras operacionais bem definidas incorporadas no modelo. As mudanças no estado de um sistema podem ocorrer de forma contínua ao longo do tempo ou em instantes discretos. Estes instantes são estabelecidos de forma determinística ou estocástica dependendo da natureza dos inputs do modelo. Embora os procedimentos para descrever o comportamento dinâmico de modelos discretos ou contínuos difiram entre si, o conceito básico de simular um sistema através da representação de mudanças no estado do sistema ao longo de um determinado período de tempo permanece o mesmo.

A simulação do atendimento nos serviços académicos

Para ilustrar o conceito de simulação, examinaremos o processamento (atendimento) de clientes (estudantes) no *guichet* dos serviços académicos. Os clientes chegam aos serviços académicos, esperam a sua vez para serem servidos (atendidos) se o servidor (funcionário) estiver ocupado com outro cliente, são servidos e depois abandonam o sistema de atendimento. Os clientes que chegam ao sistema de atendimento quando o servidor está ocupado aguardam numa fila de espera defronte do servidor. Para simplicidade de exposição, assumimos que tanto o tempo de

chegada do cliente ao sistema como o tempo de atendimento são conhecidos. Estes tempos são indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempos de chegada e de serviço

Cliente	Tempo de chegada (minutos *)	Tempo de serviço (minutos)
1	3,2	3,8
2	10,9	3,5
3	13,2	4,2
4	14,8	3,1
5	17,7	2,4
6	19,8	4,3
7	21,5	2,7
8	26,3	2,1
9	32,1	2,5
10	36,6	3,4

* entenda-se como o número de minutos após a abertura do serviço de atendimento ao público; no instante de abertura o relógio da simulação inicia a contagem do tempo a partir de zero.

O nosso objectivo é o de simular manualmente o sistema constituído pelo servidor dos serviços académicos e a respectiva fila de espera com vista a determinar duas medidas de desempenho do sistema, o nível de ocupação do servidor e o tempo médio por cliente no sistema.

Dado que a simulação é a representação de mudanças no estado do sistema ao longo de um determinado período de tempo, então devemos exercer cuidado especial na definição dos estados do sistema. Neste exemplo, os estados podem ser definidos pelo estatuto do servidor (“ocupado” ou “não ocupado”) e pelo número de clientes nos serviços académicos. O estado do sistema muda-se (1) com a chegada de um cliente aos serviços académicos, e (2) com a conclusão do atendimento de um cliente e consequente partida. Ilustraremos a simulação determinando o estado do sistema ao longo do tempo através do processamento dos eventos correspondentes à chegada e partida de clientes do sistema de forma sequencial. A Tabela 2 sumaria para cada cliente os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 2 - Simulação manual do serviço de atendimento

Cliente	Chegada	Início do serviço	Partida	Tempo na fila de espera	Tempo nos serviços acadêmicos
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3)-(2)	(6) = (4)-(2)
1	3,2	3,2	7,0	0,0	3,8
2	10,9	10,9	14,4	0,0	3,5
3	13,2	14,4	18,6	1,2	5,4
4	14,8	18,6	21,7	3,8	6,9
5	17,7	21,7	24,1	4,0	6,4
6	19,8	24,1	28,4	4,3	8,6
7	21,5	28,4	31,1	6,9	9,6
8	26,3	31,1	33,2	4,8	6,9
9	32,1	33,2	35,7	1,1	3,6
10	36,6	36,6	40,0	0,0	3,4

O início do serviço para um cliente k indicado na coluna (3) depende da situação do cliente anterior $k-1$, isto é, se este ainda está a ser servido ou se já foi servido e abandonou o sistema. O valor da coluna (3) é igual ao maior de dois tempos, o de chegada do cliente k e o de partida do cliente anterior $k-1$. O valor da coluna (4) é a soma da coluna (3) com o tempo de serviço indicado na Tabela 1. Quando o início de serviço é igual à chegada o tempo de espera é zero. Se o início do serviço é posterior à chegada, então a diferença entre aquele e esta corresponde ao tempo na fila de espera como se indica na coluna (5). O tempo nos serviços acadêmicos indica o tempo total no sistema, isto é, o tempo na fila de espera mais o tempo de atendimento. A Tabela 2 apresenta um bom resumo da informação referente aos clientes. No entanto, nada diz a respeito do servidor e da dimensão da fila de espera. Para obtermos tal informação torna-se necessário examinar os eventos associados.

Existem apenas dois eventos relevantes: a “chegada” de um cliente aos serviços acadêmicos e a “partida”. A lógica associada ao processamento dos eventos depende do estado do sistema no instante da ocorrência do evento. No caso do evento “chegada”, o estado do cliente que chega é determinado pelo estatuto do servidor: se o servidor está “desocupado”, o seu estatuto altera-se para “ocupado” e o evento partida do cliente é escalonado para ocorrer no instante determinado pela soma do tempo de



serviço mais o “instante actual”. Se o servidor está “ocupado”, o cliente entra na fila de espera e o número de clientes na fila passa a ser igual ao número de clientes na fila mais um. No caso do evento “partida”, a lógica do seu processamento é associada à dimensão da fila de espera. Se existe pelo menos um cliente na fila de espera, o servidor permanece ocupado, o comprimento da fila decresce em uma unidade e escalona-se a partida do cliente que passa a ocupar o primeiro lugar na fila de espera. Se a fila fica vazia, o servidor passa a “desocupado”. A Tabela 3 descreve os eventos pela sua ordem cronológica. O número médio de clientes no sistema é de 1,4525. O servidor está ocupado a 80%. O tempo médio por cliente na fila de espera é de 2,61 minutos e no sistema é de 5,81 minutos. Para um sistema simples como este ($M/M/1$) estes valores podem igualmente ser calculados analiticamente. Aqui, porém, o nosso objectivo é o de ilustrar a aplicação da simulação.

Tabela 3 - Descrição da simulação com base nos eventos

Tempo do evento	Cliente	Tipo de evento	Clientes na fila de espera	Clientes nos serviços académicos	Condição do servidor	Tempo morto do servidor
0,0	-	Início	0	0	Desocupado	-
3,2	1	Chegada	0	1	Ocupado	3,2
7,0	1	Partida	0	0	Desocupado	
10,9	2	Chegada	0	1	Ocupado	3,9
13,2	3	Chegada	1	2	Ocupado	
14,4	2	Partida	0	1	Ocupado	
14,8	4	Chegada	1	2	Ocupado	
17,7	5	Chegada	2	3	Ocupado	
18,6	3	Partida	1	2	Ocupado	
19,8	6	Chegada	2	3	Ocupado	
21,5	7	Chegada	3	4	Ocupado	
21,7	4	Partida	2	3	Ocupado	
24,1	5	Partida	1	2	Ocupado	
26,3	8	Chegada	2	3	Ocupado	
28,4	6	Partida	1	2	Ocupado	
31,1	7	Partida	0	1	Ocupado	
32,1	9	Chegada	1	2	Ocupado	
33,2	8	Partida	0	1	Ocupado	
35,7	9	Partida	0	0	Desocupado	
36,6	10	Chegada	0	1	Ocupado	0,9
40,0	10	Partida	0	0	Desocupado	

Deste exemplo decorrem diversos conceitos importantes. Observamos que em um qualquer instante do período de tempo de simulação, o modelo está num *estado* particular. À medida que os *eventos* ocorrem, o estado do modelo altera-se de acordo com as relações lógico-matemáticas associadas aos eventos. Pode pois dizer-se que os eventos definem a estrutura dinâmica do modelo. Podemos dizer que dado o estado inicial, conhecida a lógica de processamento de cada evento e estabelecido um método para especificar amostras, o problema da simulação reduz-se praticamente a uma questão de registo. Um elemento fundamental do esquema de registo é o calendário de eventos que estabelece o mecanismo para registar e sequenciar eventos futuros. Outro ponto fundamental é que podemos visualizar as alterações de estado segundo duas perspectivas: o *processo* que os clientes encontram na busca de serem servidos (perspectiva do cliente) e *eventos* que determinam as mudanças do estado do servidor (perspectiva do servidor).

O processo de simulação

Para o desenvolvimento com sucesso de um modelo de simulação, começa-se com a construção de um modelo simples ao qual gradualmente se adiciona complexidade à medida que se vão introduzindo os elementos necessários à resolução do problema. São dez as fases de um processo de simulação: (1) na *formulação do problema* define-se o problema a ser estudado incluindo uma declaração do objectivo a alcançar com a resolução do problema; (2) na *construção do modelo* faz-se a abstracção do sistema num conjunto de relações lógico-matemáticas em concordância com a formulação do problema; (3) com a *obtenção dos dados*, identificam-se, especificam-se e coligem-se dados; (4) *traduz-se o modelo* preparando-o para processamento por computador; (5) a *verificação* é um processo através do qual se estabelece que o código escrito para o computador (programa) executa o que é suposto ser feito; (6) na *validação* assegura-se a existência de correspondência entre o modelo e o sistema real; (7) através do *planeamento estratégico e tático* estabelecem-se as condições experimentais para utilização no modelo; (8) com a *experimentação* executa-se o modelo para obtenção dos resultados; (9) a análise do output da simulação a fim de inferir e fazer recomendações para a resolução do problema constitui a *análise de resultados* e a (10) *implementação e documentação* é

o processo de levar a cabo as decisões resultantes da simulação e de documentar o modelo e o seu uso.

Enquadramento conceptual para modelar

Para a simulação de sistemas de produção mais complexos, o recurso à abordagem manual anteriormente utilizada não é, naturalmente, adequada. Existem no mercado diversos produtos informáticos mais ou menos sofisticados que ajudam o modelizador na simulação. Trata-se de software baseado em FORTRAN, BASIC ou C++ que proporcionam alguns elementos estruturados em módulos para, por exemplo, criar e lançar no sistema entidades (encomendas, clientes, veículos, etc.) de acordo com uma distribuição estatística qualquer, afectar-lhes atributos únicos que possibilitam a sua distinção, modelizar filas de espera, prestação de serviços e contadores que permitem coligir dados estatísticos de interesse para o estudo.

No desenvolvimento de um modelo de simulação, o analista tem necessidade de seleccionar um enquadramento conceptual para descrever o sistema a ser modelado. Este enquadramento ou perspectiva encerra uma “visão do mundo” dentro da qual se percebem e descrevem as relações funcionais do sistema. Se o analista recorrer à utilização de uma linguagem de simulação, a “visão” está implicitamente incluída nessa linguagem. O analista, porém, pode recorrer a uma linguagem genérica como FORTRAN, BASIC ou C++. Neste último caso cabe ao analista a responsabilidade de organizar a perspectiva que enquadra a descrição do sistema.

Os modelos de sistemas podem ser de mudança discreta ou contínua. Um mesmo sistema pode ser modelado assumindo mudança discreta ou contínua. Na maior parte das simulações, o tempo costuma ser uma das mais importantes variáveis independentes.

A *simulação discreta* ocorre quando as variáveis dependentes se alteram de forma discreta em determinados instantes do período de tempo de simulação. Cada um destes instantes designa-se por instantes do evento. O atendimento dos serviços académicos anteriormente descrito, é um exemplo de simulação discreta. As variáveis dependentes são o estado do servidor e o número de clientes (estudantes) na fila de espera. Os instantes dos eventos correspondiam aos instantes da “chegada” de clientes ao sistema e da sua “partida” depois de haverem sido servidos. Geralmente, os valores

das variáveis dependentes não se alteram entre dois instantes de eventos. A Figura 1 mostra a resposta de uma variável dependente numa simulação discreta.

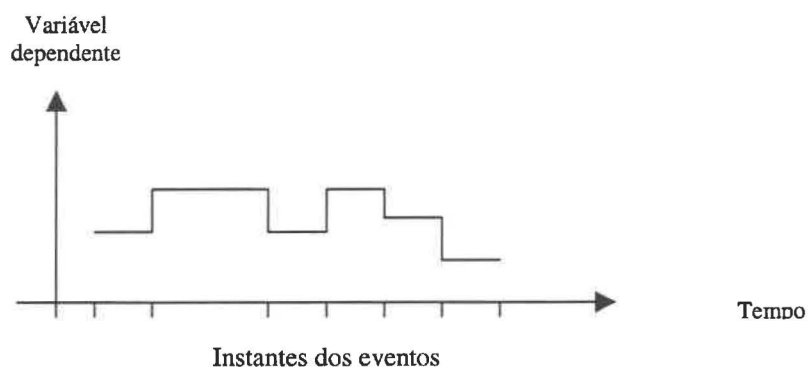


Figura 1 - Resposta de uma simulação discreta

Na *simulação contínua* as variáveis dependentes do modelo podem mudar de forma contínua ao longo do período de tempo da simulação. Num modelo contínuo as variações da variável tempo podem ser contínuas ou discretas dependendo de os valores das variáveis dependentes estarem disponíveis em qualquer ponto ao longo do período de simulação ou apenas em pontos específicos ao longo do período de simulação. A posição e velocidade de um avião a jacto constitui um exemplo onde uma representação contínua é adequada. As Figuras 2 e 3 mostram as respostas para uma simulação contínua e contínua com variações discretas, respectivamente.

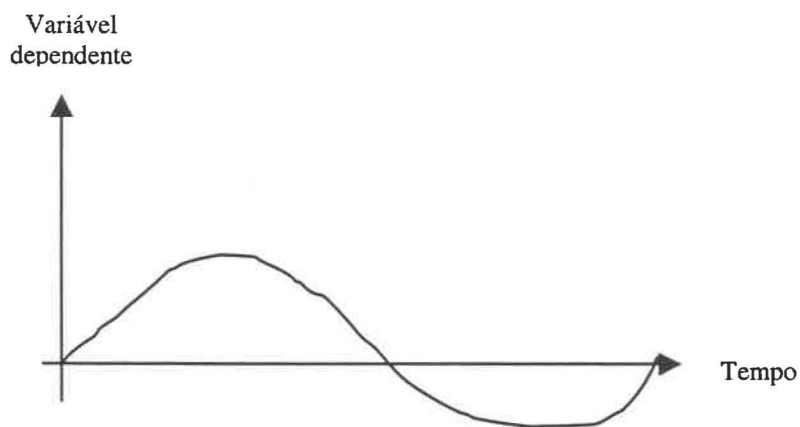


Figura 2 - Resposta de uma simulação contínua

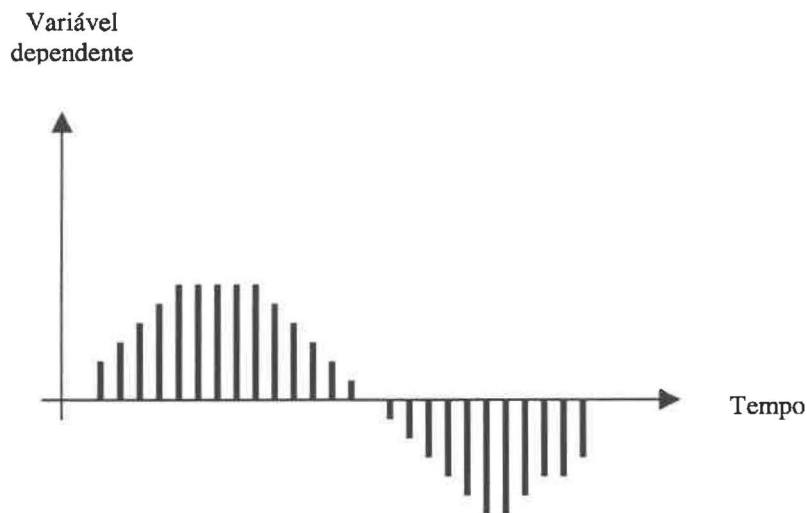


Figura 3 - Medida da resposta de uma simulação contínua com alterações discretas

Na *simulação combinada* as variáveis dependentes de um modelo podem mudar de forma discreta, contínua ou continuamente com saltos discretos. A variável tempo pode ser contínua ou discreta. O aspecto mais importante da simulação combinada decorre da interação entre as variações de variáveis contínuas e discretas. Por exemplo um processo químico pode terminar quando o nível de concentração de um determinado reagente alcança um valor pré determinado. A modelação deste processo deve conter disposições para detectar a ocorrência daquela condição e modelar as respectivas consequências. Vejamos agora a simulação discreta com um pouco mais de pormenor.

Simulação discreta

Os objectos de uma configuração limitada pelas fronteiras de um sistema discreto como pessoas, máquinas, encomendas, matéria prima ou produtos em vias de fabrico designam-se genericamente por entidades. Existem, assim, diversos tipos de entidades, cada uma delas com características ou atributos próprios. Embora as entidades possam ser objecto de diversas actividades, podem possuir características ou atributos comuns que permitam o seu agrupamento. As entidades agrupam-se em ficheiros. Assim, a inserção - por um processo qualquer - de uma entidade num ficheiro é equivalente a dizer que a entidade inserida possui pelo menos um atributo comum com as demais entidades existentes no ficheiro.

Na simulação discreta, o estado de um sistema muda apenas nos instantes em que os eventos ocorrem. Uma vez que entre dois eventos o sistema não sofre alterações, então a representação dinâmica total do sistema obtém-se avançando o tempo de simulação de um evento para o seguinte. Este mecanismo de avanço do tempo é designado por “abordagem do próximo evento” e é utilizada pela grande maioria das linguagens de simulação.

Um modelo de simulação discreta pode ser formulado (i) pela definição das mudanças no estado do sistema que ocorrem no instante do evento; (ii) pela descrição das actividades em que as entidades do sistema se envolvem, ou (iii) pela descrição do processo através do qual as entidades fluem. A relação existente entre *evento*, *actividade* e *processo* são representadas na Figura 4.

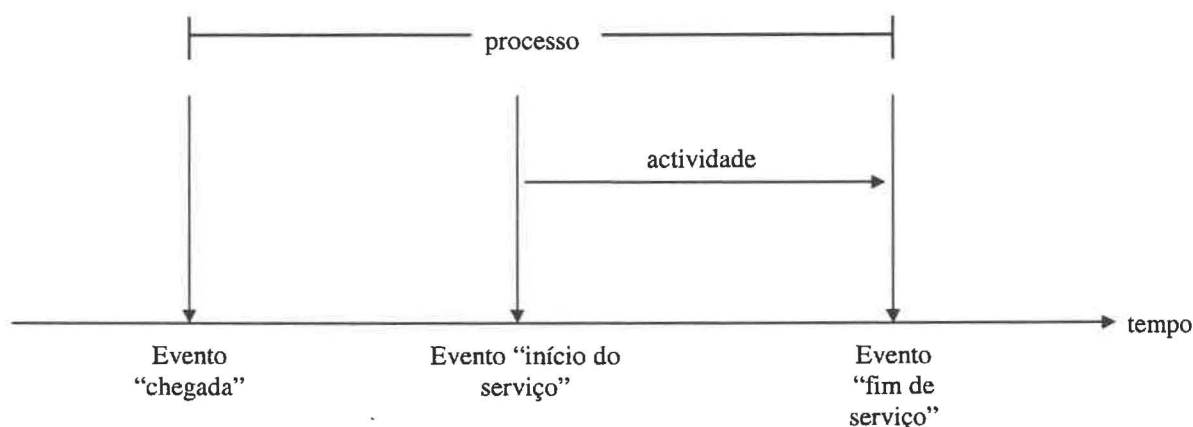
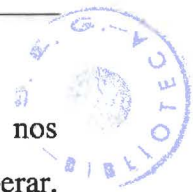


Figura 4 - Relação entre evento, actividade e processo

Estes três conceitos conduzem-nos a três orientações na simulação discreta. São referidas respectivamente por evento, exame exaustivo de actividades e processo. Veremos cada uma delas a seguir de forma sucinta.

Evento

Nesta perspectiva o sistema é modelado definindo as mudanças que ocorrem nos instantes em que os eventos têm lugar. Cabe ao analista determinar os eventos que podem mudar o estado do sistema e desenvolver a lógica associada a cada evento. A simulação do sistema opera-se através da execução da lógica associada com cada evento de uma forma sequencial em relação ao tempo.



Para ilustrar esta orientação retomemos o exemplo do atendimento nos serviços académicos. Os clientes chegam ao sistema, terão possivelmente de esperar, serão servidos e deixarão o sistema depois de servidos. O estado do sistema é definido pelo estado do servidor e pelo número de clientes na fila de espera. O estado do sistema permanece inalterado excepto quando chega um cliente ao sistema ou o abandona. Ou seja, o modelo baseado nesta orientação do tipo evento consiste na descrição do que sucede com a chegada de um cliente e com o fim da prestação de serviço ao cliente. Uma vez que as alterações no estado do sistema só ocorrem nos instantes em que estes eventos têm lugar, os eventos “chegada do cliente” e “fim da prestação do serviço” descrevem de forma exaustiva a estrutura dinâmica do sistema. No instante em que o evento tem lugar o relógio da simulação pára e o estado do sistema altera-se. Porém, outros eventos são colocados no calendário de eventos. O calendário de eventos contém os instantes futuros em que os eventos ocorrerão.

Vejamos a lógica associada com o evento “chegada do cliente”. A primeira acção a levar a cabo é a de escalonar a chegada seguinte. Fazendo-o garante-se uma sequência de chegadas. O que sucederá ao cliente que chega depende do estado do sistema no instante em que a sua chegada tem lugar. Se o servidor está ocupado, o cliente acabado de chegar terá de esperar e então o estado do sistema altera-se adicionando 1 à fila de espera. Se o servidor não está ocupado, o cliente acabado de chegar é imediatamente servido. Neste último caso o estado do sistema altera-se modificando o servidor de “não ocupado” para “ocupado” e escalona-se o “fim do serviço” para ocorrer no instante igual ao instante actual mais o tempo de serviço que o servidor necessita para servir o cliente.

Agora observemos a lógica associada ao processamento do evento “fim de serviço”. Neste evento tanto a condição do cliente como a do servidor devem ser especificadas. Assume-se que o cliente servido abandona o sistema. Quando o servidor completa a prestação de serviço verificamos em primeiro lugar se existe algum cliente em espera. Se tal se verifica, reduz-se de 1 o número de clientes em espera e escalona-se o “fim de serviço” para o cliente que passa a ser o primeiro à espera de ser servido. Se se verifica que não há clientes em espera, o estado do sistema altera-se passando o servidor de “ocupado” a “não ocupado”.

Exame exaustivo de actividades

Segundo esta orientação, o analista descreve as actividades que as entidades do sistema utilizam e prescreve as condições que determinam o início e fim de uma actividade. Os eventos que iniciam ou terminam uma actividade não são escalonados pelo analista, mas são iniciados a partir das condições especificadas para a actividade. As condições para iniciar ou acabar uma actividade são monitorizadas à medida que o tempo de simulação avança. Se as condições prescritas são satisfeitas desencadeiam-se as acções apropriadas. Para se ter a certeza de que toda e qualquer actividade é considerada, é necessário monitorizar todas as actividades em cada avanço de tempo. Para problemas onde a duração da actividade é indefinida e é determinada por um certo estado do sistema onde se satisfazem determinadas condições prescritas, esta abordagem revela-se particularmente adequada. Porém, devido à necessidade de monitorizar todas as actividades esta abordagem é relativamente ineficiente quando comparada com a abordagem do evento discreto. Daqui a sua reduzida utilização.

Processo

Muitos modelos de simulação incluem sequências de elementos que ocorrem de acordo com um padrão conhecido como, por exemplo, uma fila de espera onde as entidades aguardam pelo serviço. A lógica associada com tal sequência pode facilmente ser generalizada. Numa linguagem orientada pelo processo aquela sequência pode ser codificada para modelar o fluxo das entidades através do sistema. O código desenvolvido define a sequência de eventos que são automaticamente executados pela linguagem de simulação à medida que as entidades se movem através do sistema. A rede da Figura 5 ilustra o processo de atendimento dos serviços académicos.

O primeiro nó cria a chegada das entidades ao sistema com um tempo T entre chegadas. T pode ser uma constante ou definido a partir de uma função probabilística. O segundo nó modela a fila de espera que antecede o serviço. A fila de espera é caracterizada pelo número inicial de entidades no sistema quando se inicia a simulação (é zero quando outro valor não for definido) e pela sua capacidade (é infinita se outra restrição não for estabelecida). À fila de espera segue-se o serviço

aqui representada por um segmento de recta que modela a passagem de tempo correspondente à sua prestação. Pode ser constante ou definido de forma estocástica. Concluído o serviço, a entidade deixa o sistema. O processo proporciona assim uma descrição do fluxo que as entidades percorrem. A sua simplicidade decorre do facto de que a lógica associada está contida nos símbolos representativos dos módulos da linguagem de simulação.

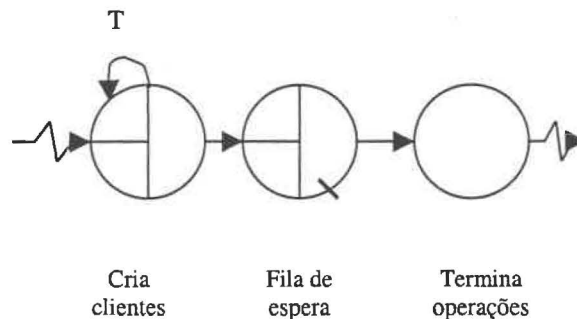


Figura 5 - Rede do processo de atendimento dos serviços académicos

A maioria das linguagens de simulação disponíveis no mercado contém módulos que replicam as acções geralmente utilizadas para descrever um processo desde a criação de entidades até à sua disposição final. Assim, de um modo geral, existem nódulos para criar entidades, para modelar filas de espera e para terminar a simulação. É impressionante como com apenas estes três nódulos se pode representar uma quantidade tão ampla de sistemas simples. Para lidar com outros aspectos de maior complexidade, existem nódulos para atribuir e alterar valores dos atributos das entidades (por exemplo “estudante de economia” e “estudante de gestão” são dois valores do atributo “licenciatura” em que atributo (licenciatura) = 0 designa “estudante de economia” e atributo (licenciatura) = 1 designa “estudante de gestão”); existem disposições para decidir a respeito do destino a dar a entidades que não podem juntar-se a uma fila de espera por ter esgotado a sua capacidade; existem nódulos para coligir dados com base nos atributos das entidades e assim se obterem estatísticas relevantes para a análise do sistema, etc.

Admitamos que as entidades são os estudantes do sistema de atendimento antes simulado. Seja ATRIB(1) a expressão do atributo 1 de cada entidade reservada

para registrar o instante em que foi criada e introduzida no sistema, isto é, para registrar o instante da chegada ao sistema de atendimento, ATRIB(2) a expressão reservada para registrar a licenciatura em que o estudante está matriculado e TNOW a variável global do sistema, isto é, não exclusiva das entidades, que a cada instante registra o tempo da simulação. Quando $TNOW = 10$, por exemplo, tal significa que decorreram 10 unidades de tempo desde que a simulação teve início. Então, no instante em que a entidade deixa o sistema depois de ter sido servida, a expressão $TNOW - ATRIB(1)$ dá-nos o tempo de permanência da entidade no sistema. Pode-se simultaneamente contar as entidades cujo $ATTRIB(2) = 1$ para se saber quantos estudantes de gestão foram atendidos, etc. Por exemplo, o tempo médio por entidade no sistema – variável de grande importância para avaliar o desempenho do sistema – calcula-se dividindo o somatório do tempo de permanência da cada entidade no sistema pelo tempo total da simulação, isto é, o somatório do valor da expressão $TNOW - ATRIB(1)$ de todas as entidades a dividir por TNOW. Retomando os valores calculados no exemplo do atendimento dos serviços académicos, podemos ver na Tabela 4 os cálculos simples para a determinação do número médio de clientes no sistema. Os estudantes da licenciatura de gestão utilizaram 81,75% do tempo de atendimento embora os da licenciatura de economia tenham um tempo médio de atendimento superior.

Tabela 4 – Cálculos para a determinação do número médio de cliente no sistema

Cliente	ATTRIB(1)	ATTRIB (2)	TNOW *	TNOW – ATRIB(1)	ACUMULADO
1	3,2	1	7,0	3,8	3,8
2	10,9	0	14,4	3,5	7,3
3	13,2	0	18,6	5,4	12,7
4	14,8	1	21,7	6,9	19,6
5	17,7	1	24,1	6,4	26,0
6	19,8	1	28,4	8,6	34,6
7	21,5	0	31,1	9,6	44,2
8	26,3	0	33,2	6,9	51,1
9	32,1	1	35,7	3,6	54,7
10	36,6	1	40,0	3,4	58,1

* valor de TNOW quando o cliente abandona o sistema

A simulação é amplamente utilizada na gestão da produção e das operações na indústria, em sistemas de transportes, sistemas computurizados, planeamento e controlo de projectos, planeamento financeiro, estudos ambientais e ecológicos e em sistemas de cuidados médicos. Pritsker [1986] lista inúmeras referências de estudos e publicações com utilização de simulação.

Referências

- Denzler, D. R., e Boe, W. J. "Experimental investigation of flexible manufacturing system scheduling decision rules", *International Journal of Production Research*, 25, 7, 1987, 979-994.
- Doulgeri, Z., Hibberd, R.D., e Husband, T. M., "The scheduling of flexible manufacturing systems", *Manufacturing Technology CIRP Annals 1987*, volume 36/1/1987, 343-346.
- Heller, W. W., "The Anatomy of Investment Decisions", *Harvard Business Review*, 29, 2, 1951, 95-103.
- Iwata, K., Murotsu, A., Oba, F. e Yasuda, K., "Production scheduling of flexible manufacturing systems", *Manufacturing Technology CIRP Annals 1982*, volume 31/1/1982, 319-322.
- Meredith, J. R., "Reconsidering the Decision-Making Approach to Management", *OMEGA: The International Journal of Management Science*, 12, 4, July 1984, 347-352.
- Meredith, J. R., Raturi, A., Amoako-Gyampah, K. e Kaplan, B., "Alternative Research Paradigms in Operations", *Journal of Operations Management*, 8, 4, 1989, 297-326
- Ozden, M. "A simulation study of multiple-load-carrying automated guided vehicles in a flexible manufacturing system", *International Journal of Production Research*, 26, 8, 1988, 1353-1366.
- Pereira, A. F., "The effect of assignment and sequencing rules on the performance of a flexible manufacturing system", Doctoral Dissertation, Clemson University, 1990.
- Pritsker, A., "Introduction to Simulation and SLAM II", Systems Publishing Corporation, West Lafayette, Indiana, 1986, 67-95.
- Shanker, K. e Tzen, Y-J. J., "A loading and dispatching problem in a random flexible manufacturing system", *International Journal of Production Research*, 23, 3, 1985, 579-595.

Stecke, K. E., Solberg, J. J., "Loading and control policies for a flexible manufacturing system", *International Journal of Production Research*, 19, 5, 1981, 481-490.



Wang, H. "An experimental analysis of the flexible manufacturing system (FMS)", in *Flexible Manufacturing Systems: Models and Studies*, Kusiak, A. (Editor); Elsevier Science (North-Holland), Amsterdam, 1986.