

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR EVENTOS DISCRETOS NA OTIMIZAÇÃO  
DO FLUXO DE PACIENTES E NA CARACTERIZAÇÃO DE CUSTOS EM CLÍNICAS  
DE MAMOGRAFIA

Fernando César Coelli

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
BIOMÉDICA.

Aprovada por:

---

Prof. Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida, Ph.D.

---

Prof. Wagner Coelho de Albuquerque Pereira, D.Sc.

---

Prof. Roberto Macoto Ichinose, D.Sc.

---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Prof. Margareth Crisóstomo Portela, Ph.D.

---

Prof. Rejane Sobrino Pinheiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2008

COELLI, FERNANDO CESAR

Simulação Computacional por eventos  
Discretos na Otimização do Fluxo de Pacientes  
e na Caracterização de Custos em  
Clínicas de Mamografia.

[Rio de Janeiro] 2008

VII, 104 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia Biomédica, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Simulação Computacional

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Quanto mais trabalho, mais tenho sorte!

## **Agradecimentos**

À Deus.

Eu sou grato a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Professores Orientadores, Renan e Wagner, pela paciência, dedicação, amizade e contribuições valiosas.

Ao Professor Macoto pelas inúmeras experiências profissionais compartilhadas e críticas construtivas.

Aos amigos do PEB, pelo companheirismo sempre presente.

A CNPq e FAPERJ, pelo apoio financeiro.

Ao INCa, pela coleta de dados, especialmente, à Tereza Feitosa e Eliete Canella.

À todos os membros da banca examinadora, principalmente, aos examinadores externos, por aceitarem o convite, honrando-nos com suas presenças.

Aos anônimos revisores de artigos, pela valiosa contribuição com suas críticas.

Aos meus familiares, dos quais nunca faltaram muito amor e incentivo durante todo o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Agradeço, sempre, à minha mãe, por tudo que representa em minha vida, pela capacidade de dizer palavras simples e confortar-me em momentos difíceis.

Agradeço à Patrícia, agora, minha esposa, pelo companheirismo, paciência e dedicação, que me possibilitaram chegar até aqui. Obrigado mesmo, *Paixão!*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR EVENTOS DISCRETOS NA OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE PACIENTES E NA CARACTERIZAÇÃO DE CUSTOS EM CLÍNICAS DE MAMOGRAFIA

Fernando César Coelli

Abril/2008

Orientadores: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida

Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

Programa: Engenharia Biomédica

A simulação por eventos discretos permite a avaliação de cenários alternativos de forma rápida e com mínimo custo. Neste trabalho foram construídos dois modelos de clínicas de mamografia, com o objetivo de avaliar sua capacidade instalada, apoiar sua reorganização de atendimento e analisar o impacto de falhas de equipamento em seus custos e estratégias de manutenção. Foram também estimadas as taxas de chegada de pacientes, minimizando seu tempo de estadia. Os resultados indicaram um superdimensionamento da capacidade instalada. Os custos por paciente situaram-se nas faixas US\$41,31-US\$53,46 (na ausência de falhas) e US\$54,53-US\$53,95 (falhas aproximando-se de 10% dos exames). A metodologia foi capaz de identificar a melhor configuração para uma clínica na presença de suposições sobre sua demanda e distribuição de falhas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DISCRETE-EVENT COMPUTER SIMULATION FOR THE OPTIMIZATION OF  
PATIENT FLOW AND EXAM COST CHARACTERIZATION IN MAMMOGRAPHY  
CLINICS

Fernando César Coelli

April/2008

Advisors: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida  
Wagner Coelho de Albuquerque Pereira

Department: Biomedical Engineering

Discrete-event simulation allows for a fast evaluation of alternative scenarios with minimum cost. This work presents several mammographic clinic models, aiming at assessing the clinics installed capacity, supporting patient scheduling definition and analyzing the impact of equipment failures over costs and maintenance strategies. Optimum patient arrival rates were also estimated. Results showed that the original configuration was overestimated. Exam costs were in the ranges US\$41.31-US\$53.46 (no failures) and US\$54.53-US\$53.95 (failures near 10%). The methodology was able to identify the best configurations according to patient demand and equipment failures.

# Índice

<b>1.Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2.Revisão de Literatura.....</b>	<b>4</b>
2.1 Contexto Histórico .....	4
2.2 Modelagens em Saúde.....	7
2.3 Modelagens de Clínicas .....	8
<b>3.Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>11</b>
3.1 Simulação - Definição .....	11
3.2 Simulação Computacional.....	12
3.3 Formulação e planejamento do modelo .....	15
3.4 Conceitos básicos .....	16
3.5 Tipos.....	19
3.6 Rotina Computacional.....	20
<b>4.Metodologia.....</b>	<b>22</b>
4.1 Dados.....	22
4.2 Escolha do Software.....	24
4.3 Estrutura do Modelo Proposto (fluxograma da clínica, proposta de manutenção) ....	26
<b>5.Resultados .....</b>	<b>32</b>
<b>6.Discussão .....</b>	<b>35</b>
<b>Referências .....</b>	<b>43</b>
<b>Apêndices .....</b>	<b>56</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Crescem em todo o mundo as pressões para otimização de recursos na área de saúde [JUN *et al*, 1999]. Entre os fatores que contribuem para o aumento de seus custos estão o aumento da idade da população mundial, da demanda de serviços na área médica e da complexidade da tecnologia médica (THORPE *et al*, 2007). Isto exige uma constante ampliação na infra-estrutura de atendimento, resultando em uma elevação substancial dos custos para este setor (KUMAR e SHIM, 2007). Nesta lógica, os custos em Saúde serão sempre crescentes, inevitavelmente atingindo patamares excessivamente elevados (JUN *et al*, 1999; TAYLOR e DANGERFIELD, 2005).

Custos relativos à oferta de serviços serão ainda mais elevados se não houver um planejamento adequado nos processos de aquisição, utilização e manutenção da tecnologia, o que pode implicar em problemas econômicos e sociais. Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que, em países em desenvolvimento, cerca de 50% dos



equipamentos médicos estão subutilizados ou fora de uso, freqüentemente devido a problemas de manutenção (WHO, 2003). Entretanto, os aspectos de como as estratégias de manutenção influenciam nos custos raramente é enfatizado nessas análises.

Por estas razões, os pacientes e a própria rede de saúde seriam grandemente beneficiados por ferramentas capazes de aumentar a eficiência dos sistemas. Por isso, em todo mundo os métodos computacionais têm sido cada vez mais empregados para alocação de recursos no ambiente hospitalar (MACKAY e LEE, 2005). A simulação por eventos discretos (SED) é uma dessas ferramentas, que possibilita aos “*decision makers*” uma boa assistência nesse desafio. As técnicas da SED, originárias da pesquisa operacional, permitem aos usuários finais (gestores ou administradores hospitalares) levantar questões do tipo “*o que aconteceria se?*” e analisar a eficiência do seu sistema (HARREL et al, 2002). A SED, tem sido empregada em diversas áreas como ferramenta de otimização e entre elas estão a indústria e a prestação de serviços como pioneiras (KELTON et al, 1998). Em Saúde, esta ferramenta foi capaz de, por exemplo, auxiliar no planejamento de construção de unidades hospitalares e na reorganização de serviços já existentes (CONNELY e BAIR, 2004). Entre os benefícios do uso da SED nestes ambientes estão as possibilidades do dimensionamento tanto de profissionais quanto de equipamentos e a identificação de necessidades em casos de eventos como epidemias ou catástrofes.

Esta pesquisa visou à construção de modelos computacionais para auxílio da administração da manutenção de equipamentos de mamografia. Para isto, foram construídos modelos de simulação, com a finalidade de analisar as paradas no atendimento em situações de manutenções preventivas (neste caso, programadas), falhas ocasionais (taxa variável) e custos relacionados ao serviço de obtenção das mamografias.

O texto a seguir consiste das seguintes seções: Revisão de literatura abordando o contexto histórico da simulação; Desenvolvimento da modelagem computacional em várias aplicações, Fundamentos teóricos, Metodologia, Resultados, Discussão e Apêndices contendo os artigos publicados.

## Capítulo 2

### Revisão de Literatura

#### 2.1 Contexto Histórico

Um dos pioneiros da simulação foi *John von Neumann*, que no final da década de 40, concebeu a idéia de múltiplas repetições de um algoritmo matemático, juntando dados estatísticos e comportamento derivados dos sistemas reais (NANCE, 1993). Isto se tornou conhecido como Método de Monte Carlo e seu uso incluía a geração de números randômicos para representar o comportamento daquilo que não podia ser modelado exatamente como em colisões de partículas nucleares em detectores ou ainda na dosimetria do tratamento com radioterapia de celulares cancerosas (GUATELLI et al, 2005), mas que poderia ser caracterizado estatisticamente. Apesar da aplicação original do método, logo se verificou sua utilidade na solução de problemas matemáticos complexos. Com o advento dos computadores, o Método de Monte Carlo foi estendido para solução de problemas

probabilísticos de caráter mais geral. Nascia, então, a simulação Monte Carlo (SALIBY, 1989). Os primeiros trabalhos foram aplicados à indústria aeroespacial dos Estados Unidos e posteriormente, na década de 60, em sistemas industriais (HARREL e TUMAY, 1995). Nesses primeiros trabalhos, os autores concentraram esforços para apresentar os conceitos e as necessidades básicas para modelagem computacional. Os trabalhos mais proeminentes em simulação naquela época foram do grupo da *General Electric* (NANCE, 1993 *apud* CONWAY, 1967). Os autores chamavam então atenção para o fato de que a linguagem de simulação possuía o poder de resolver problemas para os quais soluções de “forma fechada” (determinísticas) não eram viáveis.

Credita-se a K.D. TOCHER a construção do primeiro simulador, juntamente com D.G. Owen, em 1960 (TOCHER e OWEN, 1960). Tal simulador, mais tarde chamado de GSP (*General Simulation Program*) foi arquitetado como “método de três fases”, sendo uma das formas de estruturação de programas de simulação a eventos. Consistia em uma linguagem envolvendo os conceitos de “evento” e de “relógio”. Nesse contexto, “evento” é uma mudança no estado do sistema durante o processo de simulação, e toda atividade está delimitada por dois eventos, caracterizando seu início e o seu término. O “relógio”, na simulação, corresponde ao instante de ocorrência do evento.

O interesse pela simulação cresceu muito desde os anos 50, principalmente nos Estados Unidos, porém, segundo GORDON (1978) não houve reconhecimento imediato dos benefícios oferecidos pela simulação. Cada vez mais utilizado em várias áreas de estudo, o método teve como fator contribuinte para sua ascensão a crescente complexidade dos problemas enfrentados e a maior disponibilidade dos recursos computacionais (HARREL e TUMAY, 1995). Assim, a evolução da simulação acompanhou o avanço da

tecnologia computacional, tendo o desenvolvimento de programas e linguagens como fatores que contribuíram decisivamente para a sua disseminação.

Inicialmente a simulação era realizada em linguagens de programação geral, como Fortran, Pascal e *Basic*. Apesar da sua aplicação em qualquer problema computacional, havia a necessidade de profundos conhecimentos de programação por parte dos modelistas, pois todas as rotinas de algoritmos com estas linguagens ainda necessitavam ser construídas. Os programas de simulação evoluíram, então, para linguagens específicas, destacando-se o GPSS, SIMSCRIPT, SIMAM, SLAM (FISHMAN, 2001). Tais linguagens são blocos de código (comandos) de alto nível, representando ações e elementos característicos de cada sistema, tornando-se uma ferramenta específica para simulação.

Apesar dos avanços, a simulação ainda exigia um tempo relativamente grande para o seu aprendizado, e a eliminação de erros era uma etapa demorada. Com o tempo, apareceram os programas baseados em sistemas dinâmicos, por exemplo, o *Dynamo*, e, mais tarde, o *Stella*. Nesta fase, novos conceitos de interações e relações entre os componentes dos sistemas e do sistema com o ambiente foram difundidos (FORRESTER, 1971).

Na década de 80, o avanço da computação e a pressão exercida pela competitividade contribuíram para a expansão da simulação para as indústrias, e vários programas foram criados, por exemplo, *ProModel* e *AutoMod* (HOLLOCKS, 2006). As ferramentas se tornaram mais fáceis de utilizar. Nos anos 90, os programas ficaram mais flexíveis, com melhor animação e integração com outras linguagens. Nesta fase, os esforços se concentraram na análise dos resultados. Resumidamente, a evolução das ferramentas de simulação pode ser vista na Figura 1.

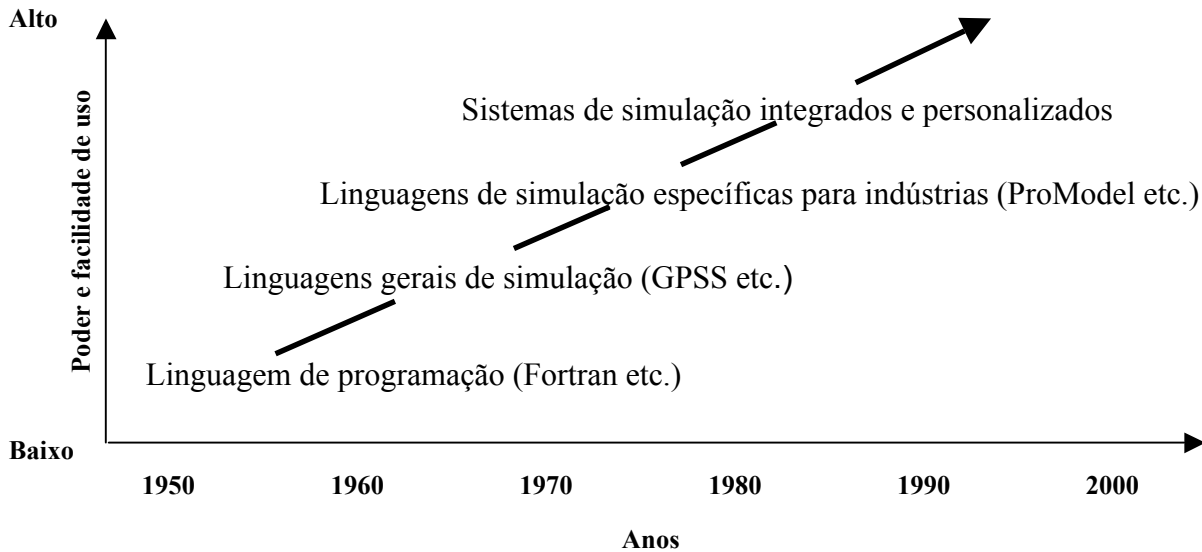


Figura 1 – A Evolução das ferramentas de simulação Computacional.

Fonte: HARREL & TUMAY (1995).

## 2.2 Modelagens em Saúde

Entre as aplicações da simulação por SED estão aquelas da área de saúde, em que há uma infinidade de situações para se explorar com esta ferramenta. Por exemplo, JAGER e RUITENBERG (1995) desenvolveram uma modelagem para prognóstico de casos futuros de AIDS, e KAPLAN (1989) avaliou estratégias preventivas para casos de epidemias HIV/AIDS. Em outros modelos, o propósito foi entender a dinâmica de epidemias, de forma a indicar a melhor estratégia de prevenção (LAGERGREN, 1994). Ainda nessa perspectiva, houve modelos para predição de incidência de doenças crônicas, como a diabetes (DE HOLLANDER E STAATSEN, 2003) e demência (DEWEY, 1992).

## 2.3 Modelagens de Clínicas

Como dito, modelos computacionais aplicados a sistemas de saúde, como em hospitais e clínicas, oferecem informações de grande valor administrativo e operacional. Neste sentido, o gerenciamento se beneficia da simulação, pela qual é possível planejar e quantificar quartos, leitos e o quadro de funcionários. A modelagem das variações na demanda de leitos é recorrente na literatura (SUMNER e HSIEH, 1972, RIDGE et al 1998, CAHILL e RENDER, 1999 e KIM et al, 2000, NGUYEN et al, 2005), dado que, via de regra, a oferta de leitos hospitalares não acompanha o crescimento populacional. BADRI e HOLLINGSWORTH (1993) e LIYANAGE e GALE (1995) conduziram estudos para determinar o quadro profissional para departamentos de emergência. KUMAR e SHIM (2007) objetivaram determinar não só o quadro, mas sim todos os outros recursos envolvidos. COFFIN et al (1993) analisaram as alocações do quadro pessoal para melhorar o fluxo de pacientes. Números de quartos e leitos foram determinados nos trabalhos de OLSON e DUX (1994). A característica comum dos trabalhos supracitados é o uso da SED para determinar os recursos e locais necessários para o processamento das entidades (pacientes).

Nas abordagens de sistemas já existentes, a SED serviu para quantificar o número máximo de pacientes para cada especialidade clínica (WILLIAMS, 1983, LAMPL et al, 2001). Especificamente, a simulação foi capaz de avaliar a probabilidade que um ou mais leitos estarem ocupados por pacientes com ataques cardíacos em função do tempo (GROOHIUS et al, 2004).

O aumento de demanda de atendimento e a necessidade de se manter um padrão assistencial resultaram em vários trabalhos dedicados ao fluxo de atendimento de pacientes

em unidades de saúde. A admissão de pacientes foi pesquisada por FETTER e THOMPSON (1965), que avaliaram a taxa de trabalho de médicos considerando o tempo de espera de pacientes. KLASSEN e ROHLER (1996), ERDEM et al (2002) e EVERETT (2002) usaram a simulação para identificar a melhor distribuição de chegadas de forma a minimizar o tempo de estadia. O ponto comum desses trabalhos foi identificar as melhores distribuições de chegadas de pacientes de forma a otimizar a estadia no ambiente hospitalar. Por outro lado, SAMAHA e ARMEL (2003) e VASILAKIS e MARSHALL (2005) objetivaram reduzir o tempo de estadia em unidades de saúde. Para isso foram pesquisados, por meio de simulação computacional, os parâmetros estatísticos que impactavam na estadia e indicados quais seriam os melhores valores.

Há situações nas quais se objetiva estudar o processamento das entidades (elementos passivos do sistema – vide capítulo Metodologia) frente aos recursos operacionais (elementos ativos) existentes. Busca-se, com isso aproveitar o que se tem disponível, alterando o processo de atendimento. Na verdade, alguns autores observam que basta uma pequena mudança de parte do processo que melhorias são verificadas. Por exemplo, GROOETHIUS *et al*, (2001) verificaram um aumento no tempo disponível para atendimento de pacientes para cateterismo alterando o horário de trabalho dos médicos. CENTENO e CARRILO (2001) dizem que um rearranjo no agendamento de pacientes foi o suficiente para organizar o serviço no *Jackson Memorial Hospital*.

Outros casos específicos foram pesquisados por HIRSHBERG et al (2005) e HUPER et al (2002) que utilizaram a simulação para determinar todo o processo de atendimento de pacientes em caso de ataque terrorista com bombas e armas biológicas. Nestas situações, as variáveis como quadro de pessoal, número de leitos, processos de



triagem de pacientes e distribuição de drogas foram avaliados de acordo com a proporção de vítimas.

SU e SHIH (2003) utilizaram a simulação para avaliar e sugerir melhorias no serviço de atendimento de emergência por ambulâncias nos hospitais de uma rede em Taipei, Taiwan. Segundo os autores, a desorganização gerava o acionamento indevido das equipes mais especializadas ou de equipes mais distantes do local do acidente. Os resultados indicaram que havia necessidade de um rearranjo das equipes de socorro, das áreas de cobertura sob responsabilidade de cada hospital, a criação de um protocolo de resposta a chamados e a diminuição do número de equipes especializadas (mais caras) prestadoras de socorro.

## Capítulo 3

### Fundamentos Teóricos

#### 3.1 Simulação - Definição

Em geral, o termo “simulação” refere-se à representação de um processo dinâmico de um sistema (conjunto de objetos) para análise de sua atividade deste, que, em algumas situações, pode ser muito grande e/ou complexa (HOLLOCKS, 2006). Segundo *HOUAISS* (2001), a simulação é a imitação do funcionamento de um processo por meio de funcionamento de outro. Para *SHIMIZU* (1975), simulação é o processo de imitar a realidade por meio de modelos, que podem conservar ou não as características físicas e lógicas do sistema imitado. Assim, a definição de simulação está intimamente relacionada aos modelos. Simular envolve a montagem de um modelo detalhado de um sistema real ou imaginário e sua experimentação, com o propósito de entender seu comportamento ou avaliar estratégias para sua operação (HARREL et al, 2002).

A simulação utiliza modelos para descreverem o comportamento de sistemas, que podem ou não existir. Em geral, o sistema que se quer retratar é muito maior, custoso e complexo que o modelo a ser construído. A simulação é uma realização alternativa para se aproximar do sistema real. Em muitos casos, o propósito da simulação é analisar e entender o comportamento do sistema em função de ações e cenários alternativos (INGALLS, 2002). Hipóteses são feitas sobre um sistema e relações matemáticas as descrevem, constituindo um modelo que revela como o sistema funciona. Se o sistema for simples, o modelo pode ser representado e resolvido analiticamente. Entretanto, os problemas de interesse do mundo real são, usualmente, complexos e com isso, não podem ser retratados por modelos matemáticos de solução analítica (NANCE, 1993) e neste caso, indica-se a simulação. De fato, como mencionado, esta ferramenta é a mais adequada para se modelar sistemas em que a variação estatística e a interdependência de seus elementos são tais que a programação linear não se mostra aplicável (FISHMAN, 2001).

### 3.2 Simulação Computacional

A simulação computacional é a ferramenta que permite que modelos sejam criados para que verificações sejam realizadas sem grandes custos e riscos. Ela permite a análise de capacidade, habilidade e comportamento sem a exigência da construção física ou experimentação com o sistema real (CHWIF e MEDINA, 2006). A simulação pode ser vista corriqueiramente nas engenharias, no meio científico e em disciplinas tecnológicas, e, em pouco mais de 50 anos, ela tem sido adaptada para uma grande variedade de aplicações. Atualmente, essas técnicas são empregadas, por exemplo, para desenvolvimento de novos

sistemas, análise de sistemas existentes, treinamento para todos os tipos de atividades e como forma de entretenimento interativo (CASSANDRAS e LAFORTUNE, 1999).

Em um sistema ainda não existente, o interesse é caracterizá-lo ou visualizá-lo para, por exemplo, determinar seu ponto ideal/crítico de operação. Por exemplo, a simulação pode determinar quais serviços serão necessários em determinado tempo para atender a um perfil epidemiológico de uma população, a partir da idade, estado de saúde, composição familiar e outros fatores relevantes (LAW e KELTON, 1991). Por outro lado, a simulação com o sistema real pode ser onerosa, perigosa e indesejável, como por exemplo, avaliar o impacto de um ataque terrorista no atendimento de pacientes nos hospitais da região afetada (HIRSHBERG et al, 1999). Assim, tal metodologia apresenta-se como uma boa ferramenta para avaliar as alternativas de funcionamento quando a simulação com um sistema real for problemática.

Quando se estabelece um modelo computacional, deve-se atentar para as suas limitações sob o ponto de vista de sua aplicabilidade. Um modelo nunca retrata exatamente a realidade, uma vez que sempre implica em simplificações. O que é necessário é que seja produzido um modelo fidedigno, que inclua os aspectos mais relevantes para a obtenção de respostas adequadas. Desta forma, as simplificações são parte de sua criação e o modelo deverá contemplar apenas os aspectos principais do sistema a ser retratado. Assim, algumas informações podem ser suprimidas ou agregadas a outras variáveis, pois podem não ser importantes para aquele modelo. Entretanto, a decisão de se inserir ou não determinadas informações se configura em uma dificuldade inicial na modelagem, que só será resolvida pelo treinamento e amadurecimento do modelista.

Um fator limitante é a disponibilidade de dados para a descrição do comportamento de um sistema. É comum o modelo requerer dados que são escassos ou indisponíveis. O

desenvolvimento do modelo deve priorizar, nestes casos, a minimização do impacto da ausência de dados.

Para se obter benefícios com a simulação, os modelos devem ser mais realistas e simplificados. Não é obrigatório o enquadramento do problema em um modelo-padrão para se obter uma solução, como ocorre, por exemplo, na programação linear. Além disso, o processo de modelagem é evolutivo, ou seja, começa-se com um modelo simples e aumenta-se sua complexidade aos poucos, identificando-se mais facilmente as peculiaridades do problema. A simulação leva ao diagnóstico de problemas e explica as interações entre as variáveis de sistemas complexos. Pode comprimir e expandir o tempo para examinar o comportamento do sistema (PEDGEN, 1995 e LAW & KELTON, 2000). Segundo SHANNON (1975), o desenvolvimento de modelos é uma arte. Isto pode explicar, talvez, a dificuldade de se apresentar um mecanismo sistemático para que o usuário possa desenvolver simulações. A modelagem, portanto, deve seguir uma seqüência lógica para facilitar sua concepção. A Figura 2 apresenta o processo de simulação de modelos desde a definição do problema até as recomendações e implementações. Assim, a técnica de simulação é atrativa pelos seguintes motivos:

- Capacidade de comprimir e expandir o tempo
- Capacidade de controle das fontes de variações
- Capacidade de parar a simulação e rever o processo
- Capacidade de restaurar o estado sistema
- Replicação do modelo
- Possibilidade de controle do nível de detalhes

Existe atualmente uma grande variedade de programas de simulação disponíveis no mercado, cada um deles com suas ênfases e aplicações particulares. A escolha, entre estes, do melhor “software” para determinada aplicação deve ser baseada em um sólido conhecimento da ferramenta. A aquisição de um pacote computacional de simulação, portanto, não é uma tarefa fácil. Essa escolha é tão relevante que há trabalhos publicados lidando especificamente com esta questão, como ELLIOT (2000), SWAIN (2001) e TEWOLDEBERHAN et al (2002). Cada “pacote”/fabricante possui uma particularidade, mas, em geral, todos oferecem capacidade de “animação” e ferramentas estatísticas sofisticadas para a análise de entrada e saída de dados. Assim, em aplicações da simulação, o primeiro passo é a definição do programa a ser adquirido.

### 3.3 Formulação e planejamento do modelo

O processo de modelagem do problema estudado e os objetivos da simulação definem a estrutura conceitual do modelo. A Figura 2 mostra as etapas seguidas em uma simulação por eventos discretos. Entre as etapas está a validação do modelo, quando é confrontado com os dados reais para a sua avaliação.

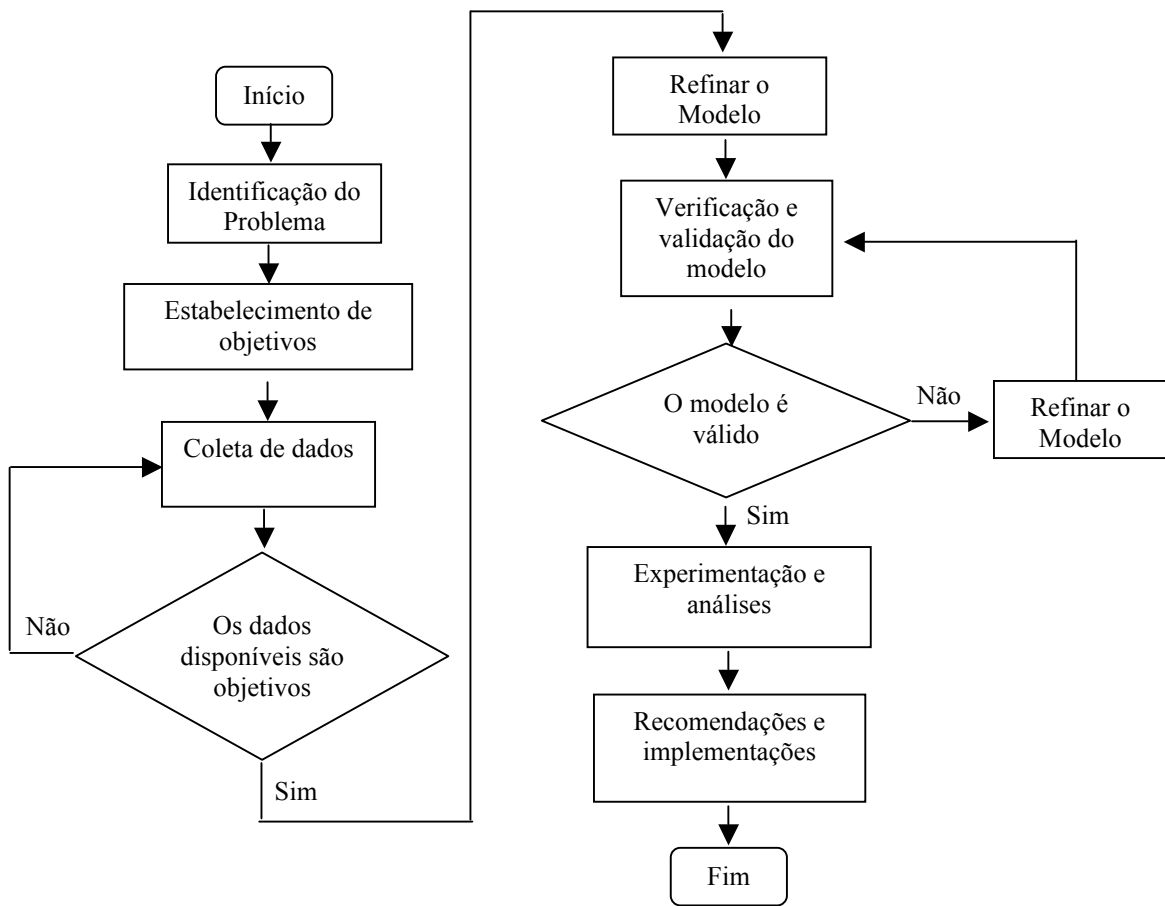


Figura 2 – Processo de modelagem para simulação (adaptado de CENTENO e CARRILO, 2001).

### 3.4 Conceitos básicos

Para o entendimento do ambiente da simulação, é necessário definir alguns conceitos básicos:

## **Sistema**

Segundo BANKS (1998), sistema é um grupo de objetos reunidos com alguma relação ou interdependência para se alcançar algum propósito. Este conceito é relativo, pois em um dado instante o conjunto de objetos pode ser uma pequena parte de um todo (subsistema) e em outro instante, este conjunto pode estar representando o todo (sistema).

## **Estado do Sistema**

É um conjunto de variáveis estocásticas e determinísticas que contém toda a informação necessária para descrever um sistema em um instante (SMITH *apud* HARREL et al, 2002).

## **Modelo**

Modelo é uma representação abstrata e simplificada de um sistema. O modelo representa os componentes mais importantes do sistema e a forma como eles interagem. O modelo deve conter apenas os detalhes estritamente necessários para capturar a essência do sistema, dentro dos propósitos para o qual foi concebido, ou, em outras palavras, não se deve prender a detalhes desnecessários. Os modelos podem ser classificados quanto à forma, finalidade e dinâmica (CHWIF e MEDINA, 2006).

Quanto à forma:

- Icônicos quando utilizam objetos (maquetes) ou figuras (mapas ou diagramas) para representar as partes do sistema real.
- Analógicos: utilizam sistemas de outra natureza, porém fáceis de manipular, que guardam analogia com o sistema real de estudo (circuitos elétricos para descrever sistemas hidráulicos, p.ex.)



- Simbólicos: utilizam variáveis e operadores simbólicos que geram sentenças lógico-aritméticas para descrever o sistema (modelos matemáticos, algoritmos).

Quanto à finalidade podem ser:

- Qualitativos ou Conceituais: são modelos preliminares, geralmente icônicos e discursivos (textuais), que buscam levantar as variáveis que julgamos ser relevante, bem como esboçar as suas relações sistêmicas, constituindo assim a base para a construção dos modelos simbólicos ou analógicos.
- Explicativos: são os que contêm as variáveis de controle que retratam o funcionamento do sistema.
- Descritivo: são os que não contêm as variáveis de controle, de forma que apenas descrevem o funcionamento do sistema sem, porém, explicá-lo, já que não se pode interferir no seu comportamento.

Quanto à dinâmica (comportamento ao longo do tempo) podem ser:

- Contínuos: quando a passagem de tempo é considerada de forma contínua, permitindo-se determinar o estado do sistema em qualquer instante do tempo.
- Discretos: quando a passagem do tempo é feita por intervalos de modo que o estado do sistema só possa ser conhecido em determinados instantes do tempo.
- Determinísticos: quando o resultado que fornecem (numérico ou não) é determinado apenas pelas condições sob as quais o experimento ou procedimento é executado. Em outras palavras, é qualquer modelo que, observado ao longo do tempo, é descrito por regras bem definidas que associam, num dado instante de tempo, valores unívocos às variáveis que descrevem o modelo, a partir do conhecimento

dessas mesmas variáveis em instantes anteriores. Assim o estado do sistema descrito pelo modelo, num dado instante, determina o estado do sistema no momento seguinte.

- Não - determinísticos: quando o comportamento de pelo menos uma das variáveis do modelo não é totalmente determinado pelo estado do sistema no instante anterior, devido a alguma influência aleatória (indeterminada) sobre a mesma. São conhecidos também como modelos probabilísticos ou estocásticos.

Para melhor entendimento da metodologia, faz-se necessário conceituar, ainda, os termos:

- Taxa de chegadas: Distribuição de chegadas de pacientes de entrada no modelo computacional
- Taxa de falhas: Número de falhas que um determinado equipamento apresenta por unidade de tempo.

### 3.5 Tipos

Classifica-se simulação em dois grupos:

#### **Simulação Contínua**

Tipo de simulação que utiliza modelos equacionais, freqüentemente sistemas físicos, que não descrevem com precisão o tempo e as relações entre os elementos constituintes. As alterações nas variáveis de estado do sistema podem acontecer continuamente ao longo do tempo simulado.

#### **Simulação por eventos discretos**

Na simulação por eventos discretos, a operação do sistema é representada como uma seqüência cronológica de eventos. Cada evento ocorre em instante de tempo que marca a mudança de estado do sistema, ou seja, as variáveis modificam discretamente em pontos específicos do tempo simulado (ROBINSON, 2004).

### 3.6 Rotina Computacional

O processo de construção de modelos de simulação envolve, invariavelmente, alguma forma de “software” computacional. Os principais elementos que constituem um programa computacional voltado à simulação de modelos de mudança discreta, são:

- *Rotina Principal*: Elemento central, responsável pela chamada das demais rotinas e pelo controle da simulação;
- *Rotina de Inicialização*: Define variáveis, atributos, variáveis de estado e etc. É o início da simulação. Os valores podem ser preestabelecidos ou fornecidos pelo usuário ao início de cada rodada de simulação.
- *Rotina do Evento  $E_i$* : são rotinas que atualizam o estado do sistema quando um tipo particular evento ocorre. Deve existir uma rotina de evento para cada um dos possíveis  $E_i$ 's. (Ex. Eventos Chegada e Saída);
- *Rotina de Avanço do Tempo*: é a rotina que determina o próximo evento e avança o RELÓGIO da simulação para o tempo em que o evento deve ocorrer.
- *Bibliotecas de Funções*: é o conjunto de rotinas que são utilizadas, principalmente, para a geração de valores aleatórios, de acordo com as principais distribuições teóricas de probabilidades, na medida das necessidades exigidas pelo modelo durante a simulação.

- *Gerador de Relatórios*: é a rotina que calcula e gera relatórios parciais ou finais sobre as inferências desejadas pelo usuário, a partir das estatísticas e dos contadores definidos no programa.

A simulação por eventos discretos é um tipo de simulação dinâmica e, basicamente, o processo de simulação ocorre da seguinte forma:

– *Fase da inicialização*:

- » relógio, contadores e outras variáveis em seus valores iniciais;
- » determinam-se os instantes de eventos futuros

– *Avanço do tempo*

- » avança-se o tempo para o próximo evento
- » processa-se o evento, atualizando o estado do sistema
- » atualizam-se os contadores e outras variáveis
- » determina-se a ocorrência de futuros eventos

– *Fim da simulação*

- » guardam-se os contadores e outras variáveis para análise

– *Repetição da simulação*

- » novas amostras independentes aumentam a confiança dos resultados

## Capítulo 4

### Metodologia

#### 4.1 Dados

Este trabalho concentrou-se na clínica de mamografia da Unidade 3 do Instituto Nacional do Câncer (INCa), localizada no bairro de Vila Isabel, cidade do Rio de Janeiro. O INCa é o órgão do Ministério da Saúde do Brasil encarregado das ações de controle do câncer no país e sua rede de cinco hospitais presta serviços gerais de oncologia (INCa 2001).

A Unidade 3 foi escolhida por se tratar de clínica de referência no tratamento do câncer de mama e por estar em obediência com a Legislação Nacional (MS - Portaria #453), garantidos por um rígido Programa de Controle de Qualidade. É uma unidade com alto fluxo de pacientes, por receber tanto pacientes em tratamento (internos) quanto os que procuram atendimento (externos).

A primeira fase deste trabalho foi a coleta de dados junto a clínica. Nesta fase foram obtidas informações a respeito do *layout* (disposição de móveis e utensílios), número de profissionais, rota de circulação de pessoas (pacientes e profissionais), seqüência e tempo para as tarefas de atendimento, produtividade e custos envolvidos. No segundo andar do Hospital localiza-se a clínica de mamografia, constituída por uma sala de troca, uma de laudos, uma de repouso para os profissionais de saúde, uma câmara escura e duas salas de mamografia, com um mamógrafo cada. O quadro funcional é composto por três técnicos e dois médicos radiologistas. O horário de funcionamento da clínica é de 8:00 horas da manhã até as 17:00 horas, com intervalo de 1 hora para o almoço.

Por meio dessas entrevistas e de observações *in loco* obtiveram-se informações a respeito da circulação de pacientes e profissionais (médicos e técnicos radiologistas), tempo para cada etapa do atendimento e distribuição de móveis e utensílios da clínica. As entrevistas e as visitas ocorreram repetidas vezes. As múltiplas coletas *in loco* objetivaram colher informações representativas.

A coleta foi realizada por entrevistas junto aos profissionais da clínica, visitas para observação e consulta a documentos relativos à produtividade e custos. As entrevistas foram realizadas em dias alternados, durante 3 meses, e durante todo o expediente de trabalho. Após a coleta, outras visitas foram realizadas para a verificação dos modelos. A coleta foi realizada por entrevistas junto aos profissionais da clínica, visitas para observação e consulta a documentos relativos à produtividade e custos. As entrevistas foram realizadas em dias alternados durante 3 meses e durante todo o expediente de trabalho. Após a coleta, outras visitas foram realizadas para verificação dos modelos. Utilizou-se um questionário aberto para levantamento de dados juntamente aos técnicos de mamografia. Os participantes da pesquisa responderam questões relacionadas à preparação

do paciente, manuseio do equipamento de mamografia, revelação do filme e dados sobre a rotina de trabalho. Outras informações foram obtidas junto à diretora da clínica sobre quadro pessoal, rotina operacional, manutenção e calibração dos equipamentos e custos. Parte da entrevista com os funcionários foi realizada em uma sala reservada e outra nas salas exames e câmara escura..

As visitas de observação consistiram de acompanhamento da rotina diária de funcionários, levantamento das dimensões da clínica e disposição de móveis e equipamentos. Observou-se as rotas mais utilizadas por técnicos e pacientes, tempo de cada passo do processo de atendimento e velocidade de movimentação no interior da clínica.

Os documentos obtidos junto à diretoria da clínica eram relativos a informações sobre os custos de insumos, equipamentos e mão de obra terceirizada de manutenção. As consultas aos documentos ocorreram quando das entrevistas junto à diretoria da clínica, dado que, por seu aspecto de privacidade, estes não puderam ser retirados do recinto.

## 4.2 Escolha do *Software*

O “pacote” escolhido para este trabalho foi o *MedModel*. A decisão foi baseada em avaliações feitas na disciplina de Simulação de Sistemas do Programa de Engenharia de Produção da COPPE e na utilização de versão demonstrativa. Vários modelos foram construídos para avaliar a capacidade do programa. Percebeu-se que o *MedModel* atendia às expectativas iniciais, com uma boa relação custo-benefício. A compra do *software* incluiu um treinamento básico junto ao representante na cidade de São Paulo.

O *MedModel* é um *software* baseado em programação orientada a objeto usando C++ e é compatível com plataforma Windows (incluindo *Windows for Workgroups* 3.11, *Windows 95*, *Windows NT* e *XP*) (DENNEY, 1997). Concebido inicialmente para os sistemas de manufatura, o *Promodel* (*PROduction MODEL*) originou outras duas versões de softwares de simulação para o sistema de saúde e empresas de serviços, respectivamente, *MedModel* e *ServiceModel*. Basicamente, as diferenças entre eles são as bibliotecas de ícones gráficos e algumas facilidades direcionadas à indústria. Todo o restante da lógica de construção é muito semelhante entre eles.

Para a compreensão da linguagem de simulação utilizada, os seguintes conceitos são necessários:

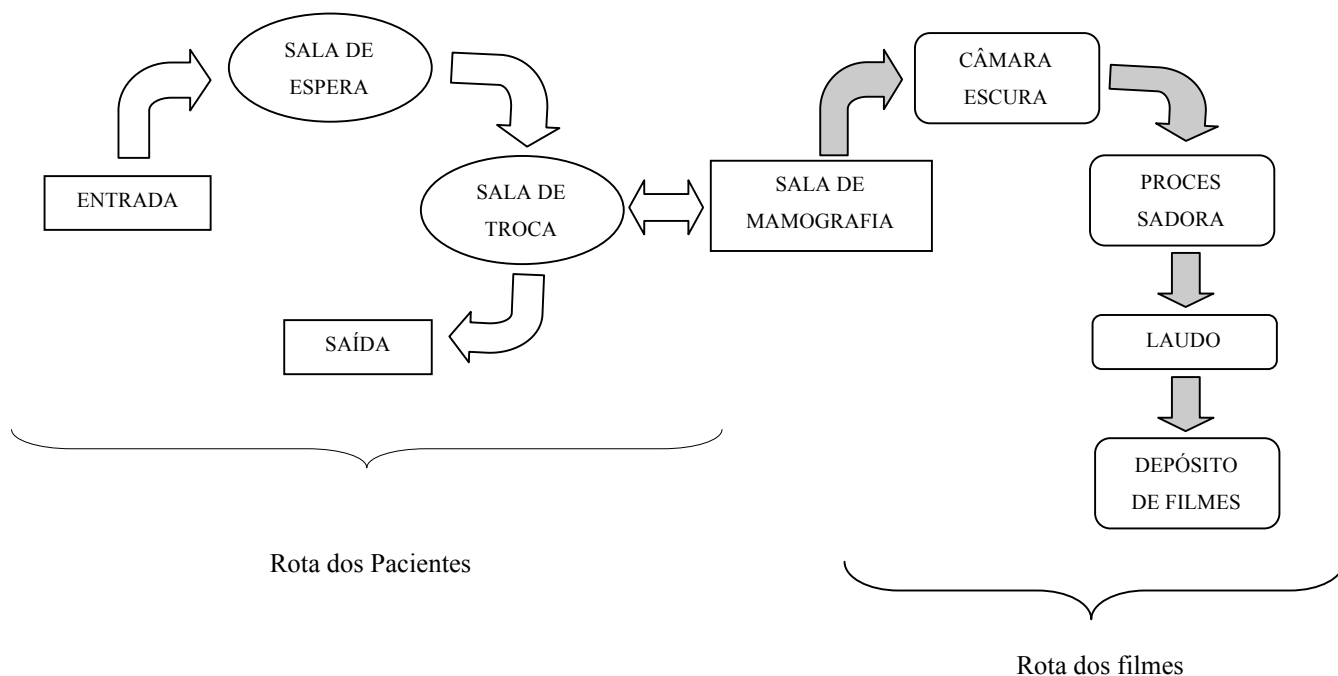
- Informações Gerais: são ajustes *default* para tempo, unidade de tempo, distância e biblioteca de ícones gráficos. Podem-se inserir também notas explicativas sobre o modelo e lógica formadora nesta caixa de diálogo.
- Locais: São os pontos fixos através dos quais as entidades se movem. Podem ser áreas de enfileiramento, locais de armazenamento ou uma sala de espera.
- Entidades: São os itens processados pelo do sistema. Por exemplo, podem representar pacientes, filmes radiografados, exames e medicamentos.
- Processamento: é uma lógica que define as operações efetuadas e o roteamento de cada tipo de entidade em cada local do sistema. Nesta fase, definem-se as ações que a entidade sofrerá, considerando os tempos de cada atividade e o próximo local de destino.
- Chegadas: é a lógica responsável pela inserção de entidades no sistema. Pode-se definir aqui a quantidade de pacientes, intervalos entre chegadas e lógicas de inserção.



- Recursos: São os elementos que realizam as ações nas entidades. Os recursos podem ser estáticos ou dinâmicos, sendo o último mais freqüente. Nesta lógica pode-se definir o caminho percorrido pelo recurso, tempo de despendido em atividades e outros parâmetros (velocidade de movimentação, tempo para pegar as entidades).
- Atributo: São as propriedades conferidas às entidades ou a um local. É qualquer coisa que possa fazer com que os sistemas tratem uma entidade ou local distintamente, em relação a outras unidades semelhantes.
- Evento: É uma ocorrência que altera o estado do sistema (o evento pode ser entendido como uma atividade primária e instantânea que não admite decomposição).

### 4.3 Estrutura do Modelo Proposto (fluxograma da clínica, proposta de manutenção)

Após a coleta de dados, a etapa seguinte foi a modelagem da clínica. O modelo básico visa a reproduzir o funcionamento normal da clínica considerando a média de atendimento do número médio de pacientes e funcionários. A Figura 3 mostra o fluxograma de pacientes e filmes radiográficos, considerados aqui como entidades, de acordo com a rotina observada na clínica.



**Figura 3 - Fluxograma da trajetória das entidades (pacientes e filmes) na Clínica.**

Seguindo a Figura 3, o fluxo de atendimento pode ser descrito como: paciente chega à clínica e espera para ser chamado pelo técnico junto à porta da entrada. Ao ser chamado, é encaminhado para a sala de troca onde, após vestir trajes apropriados, também aguarda a vez de ser encaminhado para a sala de mamografia. Caso esteja disponível, o técnico leva o paciente para a sala de mamografia onde o exame é realizado. Neste momento, outra entidade aparece no sistema, o “filme radiografado”. O técnico leva o filme para a câmara escura para revelação. O filme é, em seguida, colocado na caixa coletora, na sala de laudos. O paciente volta para a sala de troca, onde aguarda a inspeção da mamografia pelo médico. Caso necessite repetir o exame, a paciente é novamente conduzida para a sala de mamografia. Caso a mamografia seja satisfatória, o paciente é liberado, levando consigo o laudo. A mamografia fica armazenada no depósito de filmes, para estudos futuros.

A liberação do paciente está condicionada à aprovação do médico. Depois de realizado o exame, o prontuário do paciente é totalmente preenchido e uma cópia é enviada para o setor solicitante e a outra segue com o paciente.

### **Construção dos modelos**

Esta pesquisa utilizou a abordagem por eventos discretos devido à característica dinâmica desse tipo de simulação, que inclui a capacidade de processamento de interações complexas entre os componentes do modelo, o que seria fundamental para a análise de clínicas de mamografia. O processo de modelagem deste trabalho seguiu as etapas sugeridas por LAW e KELTON (2000), que definem os passos como: o *planejamento do estudo*, a *coleta de dados*, a *definição do modelo*, a *construção do modelo computacional* propriamente dito, a *validação* do modelo, a sua *experimentação* (propostas e execução), a *análise de dados* de saída, a *documentação* e a sua *implementação*. Embora todas importantes, merece especial atenção a *validação*, pois é a fase em que se observa a validade do modelo.

Dois modelos foram construídos, sendo que o primeiro retrata fielmente a clínica original com todos os seus elementos, enquanto que, no segundo, um equipamento de mamografia foi suprimido, para avaliar o desempenho da clínica com uma possível redução da capacidade de atendimento.

### **Modelagem**

A pesquisa realizada consistiu das etapas gerais descritas a seguir.

## **Etapa 1**

Dadas as configurações e restrições anteriormente discutidas, o propósito aqui foi determinar qual a taxa de chegada de pacientes mais adequada para que este permanecesse o menor tempo possível no sistema. Para tanto, variou-se o quadro de funcionários (médicos e técnicos radiologistas). O número de pacientes foi fixado em 15 por dia (valor observado na clínica estudada). Três configurações do modelo foram simuladas: *Configuração 1* com um médico e 1 técnico de mamografia; *Configuração 2* com um médico e dois técnicos e *Configuração 3*, com um médico e três técnicos. Nesta etapa não se considerou a possibilidade de repetição de exames, ou seja, a necessidade de repetição da mamografia devido a problemas na qualidade de imagem. Como resultado, identificou-se uma taxa ótima de chegada de pacientes (o tempo médio entre a chegada de dois pacientes) para cada configuração. Foi também observado o tempo de permanência (TP) no sistema (média de tempo em minutos desde a chegada à clínica até a saída). Além deste, foram observados o tempo bloqueado do paciente (TB – percentual de tempo que o paciente ficou parado esperando pela liberação de uma sala ou um profissional) e os percentuais de utilização do médico (UM), do técnico (UT) e do equipamento de mamografia (UE). Parte dos conhecimentos adquiridos nessa etapa foram apresentados em Coelli et al (2004) e Coelli et al (2006).

## **Etapa 2**

Nesta etapa, o modelo contava com a taxa de chegada de pacientes otimizada, obtida no passo anterior, e a intenção foi avaliar a capacidade instalada para cada configuração, na presença do aumento do número pacientes recebidos a cada dia. Para tanto, foram observados o TP e TB (definidos acima), o percentual de tempo em que

determinado equipamento ficava em operação (OP), o percentual de tempo disponível para atendimento de pacientes (DI), o percentual de tempo que o sistema ficava aguardando para atendimento de pacientes (ES) e o número de pacientes remanescentes devido à limitação operacional da clínica (RE). As configurações eram simuladas até apresentar pacientes remanescentes, ou seja, pacientes que não obtinham atendimento do período especificado, devido à saturação dos recursos disponíveis. Os conhecimentos adquiridos nessa etapa embasaram o artigo Coelli et al (2006).

### **Etapa 3**

O propósito aí foi determinar o impacto do índice de repetições de exames no atendimento de pacientes. Os modelos foram simulados de acordo com as otimizações obtidas nas etapas anteriores. Foram observados o TP, TB, OP, DI, ES e RE (vide acima). Similarmente ao caso acima, as configurações foram simuladas até apresentar pacientes remanescentes. Em termos de validação empírica, identificou-se a configuração que mais se aproximava da clínica em estudo, por meio da comparação dos dados da simulação e de seus dados históricos. Parte dos conhecimentos adquiridos nessa etapa são apresentados em Coelli et al (2006) e Coelli et al (2007).

### **Etapa 4**

O propósito aqui foi avaliar o impacto no atendimento considerando as manutenções necessárias para o adequado funcionamento dos mamógrafos. Os modelos contam com paradas para manutenção (aqui consideradas como manutenções corretivas) e taxas de falha foram arbitradas para os equipamentos de mamografia. Essas taxas foram baseadas em

informações empíricas obtidas com profissionais de manutenção. Dois modelos foram construídos, variando-se o número de equipamentos. Observou-se o impacto das manutenções associada à taxa de repetição de exames. Os conhecimentos adquiridos nessa etapa foram apresentados em Coelli et al (2007).

## **Etapa 5**

Os modelos aqui incluíram valores relativos aos custos de processamento das entidades (pacientes). Foram considerados como *custos* todos os recursos humanos diretamente relacionados aos procedimentos de radiodiagnóstico mamográfico (médicos e técnicos radiologistas), equipamentos, acessórios, insumos e recursos de infra-estrutura (energia elétrica, água, esgoto e telefone). Os custos de insumos, infra-estrutura e vencimentos do quadro pessoal foram diretamente obtidos junto à administração da clínica. Quando isto não era possível, valores médios disponíveis na literatura foram utilizados.

Os custos relacionados aos equipamentos e acessórios foram também obtidos na literatura (ASEVEDO e KOCH, 2004) e na Diretoria do Instituto. Considerou-se que cada paciente utiliza 4 filmes para um exame normal de mamografia e um índice de repetição de exames de 5% (ACR, 1999). Os conhecimentos adquiridos nessa etapa estão submetidos à revista especializada.

## Capítulo 5

### Resultados

A presente pesquisa deu origem a três artigos científicos, quais sejam:

1. “Simulação por eventos discretos aplicada à otimização do atendimento em uma clínica de mamografia” - *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica* (COELLI et al, 2006).
2. “Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow” - *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (COELLI et al, 2007).
3. “Computer simulation and cost analysis in a mammography clinic” - submetido à *Journal of the Operational Research Society* (COELLI et al, 2008).

O objetivo do primeiro desses (COELLI et al, 2006) foi analisar o funcionamento da clínica sob diferentes configurações para avaliação da capacidade instalada e apoio na reorganização do atendimento de pacientes. Como mencionado, foram coletadas informações relativas à capacidade de atendimento da clínica, número de pacientes atendidos por dia, número de profissionais e *layout* da clínica. Três configurações foram simuladas, mantendo-se a estrutura básica (um mamógrafo e um médico) e variando-se somente o número de técnicos de mamografia. O melhor desempenho foi obtido com a *Configuração 2* (dois técnicos), com uma taxa de chegada de pacientes representada por uma distribuição exponencial de média 29 minutos, atendimento de 15 pacientes/dia, com média de 78 minutos por paciente. A clínica real tem três técnicos e atende 15 pacientes por dia, sem marcação de horário. Os resultados indicaram que quinze pacientes poderiam ser atendidos na configuração com dois técnicos, desde que fosse implementada a organização da chegada de pacientes por meio de agendamento. Concluiu-se, ainda, que haveria a possibilidade de uma taxa de repetição de exames de até 25% sem a necessidade de transferência de pacientes para outros dias (o valor recomendado pelo *American College of Radiology* (1999) para essa taxa de repetição é de no máximo 5%).

No segundo (COELLI et al, 2007), o propósito foi desenvolver um modelo para a análise global do fluxo de pacientes, que incluísse a utilização dos equipamentos e as necessidades de pessoal, considerando o impacto do tempo de parada para manutenção. Foram modeladas duas clínicas, em um total de sete configurações (variações no número de equipamentos e no quadro de funcionários). Os modelos buscaram simular variações na taxa de chegadas de pacientes, no número de equipamentos, no número de técnicos e



médicos radiologistas, nos programas de manutenções e na taxa de repetição de exames. Como dito, os parâmetros do modelo foram obtidos por medidas diretas *in loco* e na literatura. Os resultados indicaram que as melhores taxas de chegadas de pacientes foram de 29 minutos para a *Clínica 1* (um mamógrafo, de um a três técnicos, um médico) e 21 minutos para a *Clínica 2* (dois mamógrafos, um a quatro técnicos e um médico). Assim, observou-se que a taxa de repetição e os programas de manutenções possuem um grande impacto no tempo de atendimento de pacientes, principalmente nas configurações de menor capacidade.

No terceiro, o propósito foi apresentar uma análise de custos associada à simulação de paradas no atendimento devido a falhas dos equipamentos da clínica de mamografia. A metodologia consistiu da construção de dois modelos (com um e dois equipamentos) considerando os tipos e taxas de falhas dos mamógrafos. Entre os resultados, observou-se que o custo obtido para mamografia é o dobro do valor pago pelo Sistema de Saúde do Brasil e é metade do valor praticado nos EUA, sendo, entretanto, um valor semelhante ao praticado no sistema privado do país.

## Capítulo 6

### Discussão

Existe, na literatura, uma grande quantidade de trabalhos em simulação por eventos discretos, indicando seu histórico de sucesso (VASILAKIS e MARSHALL, 2005, KUMAR e SHIM, 2007). Entre essas aplicações estão aquelas relacionadas à otimização de instalações físicas (GROOHIUS, et al, 2001), de recursos humanos (STAHL et al 2003) e da análise de impacto do aumento de demanda em serviços de emergência médica (SCHULL et al, 2003, WEISS et al, 2004). Entretanto, a pesquisa em simulação voltada para as tomadas de decisão em manutenção de equipamentos médicos é escassa, sendo essas pesquisas, em geral, voltadas para as áreas militares ou de prestação de serviços (NOWAK et al, 2007). Portanto, a utilização da simulação para auxílio de decisões relativas à manutenção de equipamentos médicos é uma sólida possibilidade, tendo em vista a confiabilidade da ferramenta e os resultados obtidos em outras áreas. Além disso, os efeitos da utilização desta ferramenta na gestão em saúde seriam logo percebidos por

pacientes e pelo próprio sistema, por exemplo, com a redução do tempo de espera por serviços, que pode ser obtida a partir de medidas de simples implementação, sugeridas pela simulação.

Uma das grandes vantagens da simulação computacional é a de representar uma situação real por um modelo, e, a partir dele, realizar experimentações que seriam difíceis na prática, devido à sua complexidade e custo. Neste trabalho, tais experimentações tiveram êxito em analisar um sistema de atendimento de pacientes, por exemplo, simulando a utilização do mamógrafo com diferentes taxas de falhas.

Modelos de simulação devem ser verificados e validados como parte do processo de garantia da confiabilidade de seus resultados. O processo de verificação, importante na construção do modelo, está situado na transição entre modelo conceitual e a representação computacional (BANKS et al, 2001). É nesta fase que se observa se o modelo está sendo desenvolvido corretamente, e se ele corresponde à realidade. Em outras palavras, é quando se analisa se o modelo desenvolvido é aceitável.

Apesar dos objetivos desses processos serem diferentes, eles são conduzidos simultaneamente. No presente estudo, a validação consistiu de comparações de tempo de atendimento com a série histórica da clínica estudada, e a verificação foi realizada no decorrer da construção dos modelos, identificando *bugs* e situações de funcionamento inadequado. Assim, constatou-se que a melhor configuração em termos de tempo de atendimento é aquela identificada no segundo artigo (COELLI et al, 2006). Esta configuração, [dois técnicos, taxa de chegada de pacientes exponencial de média 29 min., atendimento de 15 pacientes/dia, com média de 78 min. de atendimento por paciente] apresentou resultados concordantes com aqueles da série histórica do INCa, como por exemplo em relação ao tempo de permanência do paciente dentro da clínica. Assim, é

possível afirmar que os modelos desenvolvidos obedecem aos critérios metodológicos necessários em simulações desta natureza.

Note-se que o uso de uma distribuição exponencial como representação da distribuição de chegadas de pacientes é justificável, pois vários trabalhos na literatura indicam ser a melhor representação do processo de chegadas de pacientes (HUPERT et al 2002). As tabelas contendo os parâmetros de entrada dos modelos indicam valor “Infinito” para as capacidades da *Sala de Espera, Troca, Câmara Escura e Sala de Laudos*. Isto indica que estes locais não são críticos para os modelos, ou seja, as clínicas apresentam capacidade suficientemente grande para comportar os pacientes que chegarem, sem interferir no seu funcionamento.

Inicialmente, para a obtenção de dados cruciais para a construção dos modelos de simulação, visitas e entrevistas foram realizadas na clínica. Essas informações foram utilizadas para idealizar o *lay-out* da clínica e seus processos das rotinas operacionais. As entrevistas com funcionários foram realizadas individualmente, de forma a garantir a sua independência. Além disso, as visitas serviram para a caracterização do fluxo de atendimento de pacientes e da rotina de repetição de exames.

Ainda em relação ao levantamento de dados, o plano inicial incluía o levantamento de dados de custo junto aos fabricantes, setores de manutenção de hospitais/clínicas e literatura. Entretanto, em nenhuma dessas pretendidas fontes foi possível obter tais dados. Em resumo, os fabricantes não oferecem tais informações quando da venda, os procedimentos de aquisição de equipamentos por parte do sistema público de saúde não incluem este índice e os departamentos de manutenção consultados não possuíam séries históricas relativas aos mamógrafos. Em geral, as fichas de manutenções disponíveis descreviam superficialmente os serviços, impossibilitando a identificação de taxas de falhas ou de

outras informações relevantes. Ao mesmo tempo, na literatura, não foi obtida nenhuma referência sobre tais taxas, mesmo que aproximadas.

O sistema de obtenção de mamografias é um componente fundamental no combate do câncer de mama e, neste âmbito, a disponibilidade e eficiência do seu serviço deve ser objeto de cuidadosa análise em função de sua influência no desempenho na detecção de lesões em estágios precoces, condição fundamental para o sucesso do tratamento. Desta forma, os mamógrafos devem ser mantidos em condições adequadas de uso para atingir tal objetivo.

Os trabalhos principais (Apêndice 1) (seção “resultados”) representam fases diferentes da aplicação da ferramenta computacional na modelagem do funcionamento de clínicas de mamografia. Assim, o primeiro (COELLI et al, 2006) apresenta uma simulação com especial ênfase nos conceitos, viabilidade de uso e outros aspectos relativos ao desenvolvimento de modelos discretos. Sua principal contribuição foi a identificação do impacto de paradas programadas e não programadas na rotina operacional de clínicas de mamografia. Os modelos desenvolvidos incluíram variáveis capazes de fornecer uma representação realista das clínicas estudadas, como por exemplo, o uso de valores reais da taxa de chegadas de pacientes e o tempo de processamento das entidades. Adicionalmente, a rotina desse modelo contemplou a possibilidade da repetição de exames, o que é importante, pois esta é uma ocorrência normal em serviços de radiodiagnóstico. Além disso, como os dados utilizados foram reais, houve a validação do modelo, comparando-o com as séries históricas da base de dados. A contribuição desse estudo foi a aproximação do modelo com a realidade simulada, tornando a simulação mais confiável sob aspecto dos resultados. Portanto, o passo inicial da utilização de simulação computacional por eventos discretos foi atingido.

No segundo artigo (COELLI et al, 2007), foram desenvolvidos dois modelos, considerando alterações no índice de repetição de exames e paradas aleatórias dos equipamentos de mamografia, que objetivavam representar as falhas eventuais durante a rotina de atendimento. Os dados de sistema de obtenção de mamografia são escassos na literatura e a simulação foi baseada em dados de falha obtidos da experiência de profissionais da área de manutenção. A contribuição fundamental deste trabalho foi a identificação da capacidade instalada e das taxas de chegadas de pacientes ótimas.

O terceiro artigo (COELLI et al, 2008) representa já uma abordagem ampliada, na qual é realizada uma análise de custos a partir de dois modelos de clínicas. Além de parâmetros de desempenho das configurações, observaram-se os custos totais de cada configuração, apresentando custos unitários das mamografias por configuração simulada.

Conforme anteriormente discutido, a escolha do programa de simulação é uma tarefa complexa e deve ser baseada em critérios como funcionalidade, aplicabilidade e custos. Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor, uma disciplina abordando o tema Simulação foi cursada no Programa de Engenharia de Produção da COPPE. Naquela oportunidade obteve-se conhecimento sobre os fabricantes e *softwares* de simulação disponíveis no mercado. Observou-se que, em geral, os “pacotes” ofereciam versões demonstrativas e rotinas gráficas com animações. Assim, vários modelos foram construídos para avaliar a capacidade desses “pacotes”, sendo escolhido o *MedModel*, pois este preencheu os requisitos iniciais, como flexibilidade para modelagens em clínicas e possibilidade de tratamento de dados de entrada.

A simulação foi útil para identificar que uma clínica com a configuração realmente em uso [dois mamógrafos, três técnicos radiologistas] está superdimensionada para a atual demanda. Outro benefício trazido pela simulação foi o agendamento de pacientes. Com tal

ferramenta, identificou-se a melhor taxa de chegadas de pacientes para que estes permaneçam o menor tempo possível dentro da clínica.

Durante o processo de simulação, identificaram-se situações específicas, como a necessidade de re-agendamento de pacientes em casos de manutenção preventiva para configurações de pequena capacidade instalada. Neste caso, o comportamento do sistema apresenta uma elevação das taxas de utilização de recursos humanos e físicos, devido ao número de pacientes acumulados pela necessidade de manutenção. Assim, para que não houvesse pacientes sem atendimento, o agendamento destes deveria ser refeito.

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de modelos para determinar os limites de operação de uma clínica, considerada como padrão, de forma a avaliar a utilização de seus recursos físicos e humanos. Assim, uma avaliação global foi realizada em termos de fluxo de pacientes e tempos de manutenção de equipamentos. Os modelos desenvolvidos possuem os pacientes como entidades principais, ou seja, os processos foram organizados em seu entorno, e a principal variável de interesse foi a média de tempo de espera dentro do sistema.

A utilização de simulação por eventos discretos para auxílio de tomadas de decisão em manutenção é um tema pouco explorado no Brasil. Não foi observado nenhum trabalho nesta direção em âmbito nacional. Conforme discutido, as principais aplicações relativas à manutenção são oriundas da área militar. Evidentemente, estas áreas demandam estudos rigorosos de seus processos de manutenção. Entre os benefícios da incorporação dessas metodologias à área de saúde está a obtenção de maior precisão em intervenções de manutenção e otimização. Por outro lado, o desenvolvimento de modelos para simulação depende de uma boa coleta de dados, fato comum em aplicações militares e industriais, mas que não é verificado com frequência na área médica, o que dificulta aplicações nessa área.

Adicionalmente, outros trabalhos utilizando a metodologia de simulação por eventos discretos foram obtidos durante o decorrer desta tese, sendo que alguns foram frutos da colaboração na orientação de dois alunos de mestrado do Programa de Engenharia Biomédica da COPPE. Os trabalhos encontram-se no Apêndice 2 com uma breve descrição sobre cada um.

O quadro teórico delineado neste trabalho não se aplica exclusivamente à manutenção de equipamentos de mamografia e sim a vários sistemas dinâmicos que envolvam rotina de atendimento. Por exemplo, todas as especialidades da radiologia possuem, em geral, uma seqüência de passos como a descrita neste trabalho [preparação do paciente, o exame propriamente dito e a interpretação do exame]. Assim, a modelagem aqui descrita seria de fácil aplicação a esses casos, e a outros na área de saúde.

Pode-se indicar, como limitação desta pesquisa, a necessidade de dados coletados *ad hoc*, ou seja, especificamente para a clínica em questão, o que diminui sua generalizabilidade. De qualquer forma, caso clínicas com configurações distintas desejassem reproduzir o trabalho aqui apresentado, seria sempre possível a coleta de novos dados e a produção de novos modelos, de acordo com as características de interesse específicas para cada caso. Outra limitação foi uso de rotinas “padronizadas” de manutenção, ou seja, que foram supostas homogêneas para todos os equipamentos envolvidos, independentemente de suas intensidades de utilização reais. No entanto, uma vez que os equipamentos analisados são mamógrafos, que já possuem rotinas de operação bem definidas, pode ser suposto que o uso dessas rotinas padronizadas seja aceitável.

Como prosseguimento deste trabalho, poder-se-ia acrescentar rotinas para simular distribuições de falhas em outros componentes do modelo, como por exemplo, as processadoras de filmes. Além disso, outras rotinas de manutenção, considerando o



desgaste diferenciado do equipamento devido à sua utilização, poderiam ser incorporadas. Outro aspecto que poderia ser contemplado é a rotina de manutenção com atributos de qualidade. Desta forma, a própria manutenção se apresentaria como um componente decisivo no atendimento de pacientes. Finalmente, pode-se afirmar que o uso de simulação por eventos discretos mostrou ser uma valiosa ferramenta para construção e entendimento de modelos dinâmicos baseados em situações reais. Particularmente neste trabalho, a simulação propiciou uma quantificação do impacto operacional e financeiro das falhas e estratégias de manutenção realizadas nos equipamentos de mamografia.

## Capítulo 7

### Referências

AMERICAN COLLEGE OF RADIOLOGY, 1999, Mammography Quality Control Manual. Reston, Virginia: ACR (Committee on Quality Assurance in Mammography).

ASEVEDO, F. KOCH, H., 2004, “Avaliação dos custos para implantação de um serviço de mamografia”. *Radiologia Brasileira*, v.37, nº 2 (Mai), pp. 101 – 105.

BADRI, M.A, HOLLINGSWORTH, J., 1993, "A simulation model for scheduling in the emergency room", *International Journal of Operation and Production Management*, v.13, nº 3, pp.13-24.

BANKS, J., 1998, *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*, 1 ed. New York, Wiley Interscience.

BANKS, J., CARSON, J, NELSON, B., et al, 2001, *Discrete-Event System Simulation*, 3 ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA N.453, DE 01 DE JUNHO DE 1998. BRASÍLIA, DF.

CAHILL, W., RENDER, M., 1999, “Dynamic Simulation Modeling of ICU Bed Availability”. In: *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, pp1573-1576, Phoenix, Aug.

CASSANDRAS, C.G., LAFORTUNE, S., 1999, *Introduction to discrete event systems*, 1 ed. Boston, Kluwer Academic Publishers.

CENTENO, M.A., CARRILO M., 2001, “Challenges of Introducing Simulation as a Decision Making Tool”. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, pp 17-21, Arlington, Dec.

CHWIF, L., MEDINA, A. C., 2006, *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações*. 1 ed. São Paulo, Bravarte.

COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., et al., 2004, “Simulação Computacional de Estratégias de Manutenção de Equipamentos de Mamografia”. In: *IFMBE Proceedings*, v.5, nº 1, pp. 397-400, João Pessoa - PB, Set.

COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., et al., 2006, “Simulação por eventos discretos aplicada à otimização do atendimento em uma clínica de mamografia”, *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v.22, nº 3, pp. 203-212.

COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., et al., 2007, “Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow”. *Computer Methods and Biomedicine Programs*, v.87, pp. 201–207.

COFFIN, M., LASSITER, G., KILLINGSWORTH B. et al, 1993, “A simulation model of an X Ray facility”. In: *1993 SCS Western multiconference on Simulation: simulation in the health sciences and services*, pp 914-918

CONNELLY, L.G., BAIR, A.E., 2004, “Discrete Event Simulation of Emergency Department Activity: A Platform for System-level Operations Research”, *Academic Emergency Medicine*, v.11, n.11 (Nov), pp. 1177-1185.

CONWAY, R. W., MAXWELL W.L., MILLER L.W., 1967, *Theory of Scheduling*, 1ed. Reading, MA, Addison-Wesley.

DE HOLLANDER, A.E.M., STAATSEN, B.A.M., 2003, “Health, environment and quality of life: an epidemiological perspective on urban development”. *Landscape and Urban Planning*, v. 65, nº1 (Sep), pp. 53–62

DELORME, L., ROUSSEAU, J.M., 1982, “A multiregional equilibrium model for resource allocation in a health care system (MEMRA)”, Department d’informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montreal, Publication #42.

DENNEY, S.H., 1997, “MedModel® Healthcare Simulation Software”. In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, pp 581- 586, Atlanta, Dec.

DEWEY, M., 1992, “Estimating the incidence of dementia in community from prevalence and mortality results”. *International Journal of Epidemiology* , v.21, n.3 (Jan), pp. 533-536.

ELLIOT, M. 2000. Buyer’s Guide: Simulation Software. *IIE Solutions*, v.32, n° 5 (May), pp. 55-64.

ERDEM H.I., DEMIREL, T., ONUT, S., 2002, “An Efficient Appointment System Design for Outpatient Clinic Using Computer Simulation”. In: *The Proceedings of the 2002 Summer Computer Simulation Conference*, pp. 193-199, San Diego (CA), July.

EVERETT, J.E., 2002, “A decision Support Simulation model for the management of an elective surgery waiting system”. *Health Care Management Science*, v.5 (Apr), pp. 89-95.

FERREIRA, R.B., COELLI, F.C., PEREIRA, W.C.A., et al, 2004, “Análise de Desempenho do Fluxo de Atendimento Hospitalar com Auxílio da Simulação Computacional”. In: *IFMBE Proceedings*, v.5, n° 1, pp. 389-392, João Pessoa, Set.

FERREIRA, R.B., COELLI, F.C., PEREIRA, W.C.A., et al, 2006, “Otimização do Atendimento de um Grande Centro Cirúrgico por Meio de Simulação Computacional”. In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, pp. 681-684, São Pedro, São Paulo, Set.

FETTER, R.B., THOMPSON, J.D., 1965, “The Simulation of Hospital Systems”. *Operational Research*, v.13, pp. 689-711.

FISHMAN, G.S., 2001, *Discrete event simulation: modeling, programming and analysis*. Londres, Springer-Verlag. (ISBN 0-387-95160-1).

FORRESTER, J.W., 1971, "Counterintuitive Behavior of Social Systems," *Technology Review*, January 1971.

GORDON, G., 1978, “The development of the general purpose simulation system (GPSS)”. *ACM SIGPLAN Notices*, v. 13, n<sup>o</sup>. 8 (Aug), pp. 183 –198.

GROOETHIUS, S., HASMAN, A., van POL, P.E.J., et al., 2004, “Predicting capacities required in cardiology units for heart failure patients via simulation”. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v.74, n.2 (May), pp.129-141.

GROOETHIUS, S., MERODE, G.G., HASMAN, A., 2001, “Simulation as decision tool for capacity planning”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v.66, n<sup>o</sup> 2-3 (Sep), pp. 139-151.

HARREL, C.R., MOTT, J.R.A., BATEMAN R.E., et al., 2002, *Simulação Otimizando os Sistemas*, 1ed. São Paulo, Belge IMAM.

HARREL, C.H.; TUMAY, K., 1995, *Simulation Made Easy: A Manager's Guide* 1ed. Norcross, Engineering & Management Press.

HIRSHBERG, A., STEIN, M., WALDEN, R., 1999, "Surgical resource utilization in urban terrorist bombing: a computer simulation", *The Journal of Trauma*, v. 47, n° 3 (Sep), pp. 545-550.

HOLLOCKS, B.W., 2006, "Forty Years of discrete-event simulation – a personal reflection", *Journal of the Operational Research Society*, v.57 (Dec), pp.1383 – 1399.

HOUAISS, A. (Ed 1). *Dicionário da Língua Portuguesa*. 2001. Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia. Rio de Janeiro: Editora Objetiva.

HUPERT, N., MUSHLIN A.I., CALLAHAN M.A., 2002, "Modeling the Public Health Response to Bioterrorism: Using discrete event simulation to design antibiotic distribution centers", *Medical Decision Making*, v.22, n° 17 (Jun), pp. S17-S25.

KAPLAN, E.H., 1989, "Needles that kill: Modelling human Immunodeficiency Virus transmission via shared drug injection equipment in shooting galleries". *Reviews of Infectious Diseases*, v.11, pp. 289-298.

KELTON, D.W., SADOWISKI, R.P., SADOWISKI, D.,1998, *Simulation with Arena*. 3 ed. Boston, McGraw-Hill.

KIM, S.C, HOROWITZ, I., YOUNG, K.K., et al., 2000, "Flexible bed allocation and performance in the intensive care unit", *Journal of Operations Management*, v.18, n°4, (Sep), pp.427-43.

KLASSEN, K.J., ROHLEDER, T.R., 1996, "Scheduling outpatient appointments in a dynamic environment", *Journal of Operations Management*, v.14, n° 2 (Jun), pp.83-101.

KUMAR, A., SHIM, S.J., 2007, "Using Computer Simulation for Surgical Care Process Reengineering in Hospitals", *Quality Control and Applied Statistics*, v. 52, n° 1 (Nov), pp.95-98.

INGALLS R.G., 2002. "Introduction to Simulation". In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp. 7- 16, San Diego, California, Set.

JAGER, J.C., RUITENBERG E.J., 1995, "Mathematical modelling of HIV infection". In: *Biomedical and Health Research (3rd ed.)*, *AIDS Research at EC Level*, v.6 pp. 36-48, Chicago, Jun.



JUN, J.B., JACOBSON, S.H., SWISHER, J.R., 1999, “Application of discrete-event simulation in health care clinics: A survey”. *Journal of the Operational Research Society*, v. 50, n.2 (Fev), pp. 109 –123.

LAGERGREN, M., 1994, “Dependency and the structure of care – some results from simulation of an area-based system of care”, *Health Policy* v.29, n.3 (Feb), pp. 229-246.

LAMPL, C., KLINGER, D., DEISENHAMMER, E., *et al.*, 2001, “Hospitalization of the patients with neurological disorders and estimation of the need of beds and of the related costs in Austria’s non profit hospitals”. *European Journal Neurological* v.8, n.6 (Nov), pp.701-706.

LAW, A.M., KELTON, W.D., 1991, *Simulation Modeling and Analysis*. 2ed. New York, McGraw-Hill.

LAW, A.M., KELTON, W.D., 2000, *Simulation Modeling and Analysis*, 3ed, Boston, McGraw-Hill.

LIYANAGE, L., GALE, M., 1995, “Quality improvement for the Campbelltown hospital emergency service”, *Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century. IEEE International Conference on*, v.3, (Out), pp.1997-2002.

MACKAY, M., LEE, M., 2005, "Choice of Models for the Analysis and Forecasting of Hospital Beds". *Health Care Management Science* v.8, n°1, pp. 221-230.

MOSCICKI, J., GUATELLI, S., PIA, M.G., et al, 2005, "Monte Carlo Simulation for radiotherapy in a distributed computing environment". *The Monte Carlo Method: Versatility Unbounded in a Dynamic Computing World*. Chattanooga, Tennessee: 2005, CD-ROM, Produzido por American Nuclear Society.

NANCE, R.E., 1993, "A History of Discrete Event Simulation Programming Languages". *ACM SIGPLAN Notices*, v.28, n° 3 (Mar), pp.149-175.

NGUYEN, J.M., SIX, P., ANTONIOLI, D., et al, 2005, "A simple method to optimize hospital beds capacity". *International Journal of Medical Informatics*, v.74, n° 1(Sep), pp.39-49.

NOWAK, D.J., PRICE, I., LAMONT, G.B., 2007, "Self Organized UAV Swarm Planning Optimization for Search and Destroy Using Swarmfare Simulation", In: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, pp. 1315 - 23, Washington, Dec.

OLSON, E., DUX, L.E., 1994, "Computer model targets best route for expanding hospital surgicenter", *Industrial Engineering*, v.26, n° 1, pp.24-26.

PEDGEN, C.D., SHANNON, R.E., SADOWSKI, et al, 1995, *Introduction to Simulation Using SIMAN*. 2 ed. New York, McGraw-Hill.

PROMODEL CORPORATION, 2002, *MedModel Users Guide*, Promodel, Utah.

RIDGE, J.C, JONES, S.K, NIELSEN, M.S, et al., 1998, "Capacity planning for intensive care units". *European Journal of Operational Research*, v.105, n<sup>o</sup>.2 (Mar), pp.346-355.

ROBINSON, S., 2004, *Simulation - The practice of model development and use*. 1<sup>a</sup> ed, Nova York, John Wiley & Sons.

SALIBY, E., 1989, *Repensando a simulação - A amostragem descritiva*. 1<sup>a</sup> ed, Editora, São Paulo, Atlas e Editora da UFRJ.

SAMAHA, S., ARMEL, W.S., STARKS, D.W., 2003, The Use of Simulation to Reduce the Length of Stay in an Emergency Department. In: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 1907-1911, New Orleans, Dec.

SCHULL M.J., LAZIER, K., VERMEULEN M., et al., 2003, "Emergency department contributors to ambulance diversion: a quantitative analysis", *Annals of Emergency Medicine*, v.41, n<sup>o</sup>4 (Apr), pp. 476-79.

SHANNON, R.E., 1975, *Systems simulation: the art and science*, 1ed, New Jersey, Prentice Hall.

SHIMIZU, T., 1975, *Simulação em computação digital*. 1 ed. São Paulo, Edgard Blucher.

SUMNER, A.T., HSIEH R.K.C., 1972, “Long-range Prediction of Examining Room Requirements”, *Health Services Research*, v.7, n° 3 (mar), pp.221-230.

STAHL J.E., ROBERTS M.S., GAZELLI S., 2003, “Optimizing management and financial performance of the teaching ambulatory care clinic”, *Journal of General Internal Medicine*, v.18, n° 4, pp. 266.

SU, S., SHIH, C. 2003 “Modeling an emergency medical services system using computer simulation”. *International Journal Medical Informatics*, v. 72, n° 1 (Dec), pp. 57-72.

SWAIN, J.J., 2001, “Power Tools for Visualization and Decision Making”. *OR/MS Today*, v.28, n° 1 (Feb), pp.52-63.

TAYLOR, K., DANGERFIELD, B., 2005, “Modeling the feedback effects of reconfiguring health services”. *Journal of the Operational Research Society*, v.56, n.1 (Sep) pp.659-675.

TEWOLDEBERHAN T.W., VERBRAECK A., VALENTIN E., et al., 2002, “An Evaluation and Selection Methodology for Discrete-Event Simulation Software”, In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp. 67-75, San Diego, California, Dec.

TOCHER, K.D., OWEN, D.G., 1960, “The automatic programming of simulations”. In: *Proceedings of the Second International Conference on Operational Research*, pp. 50-68, New York, Dec.

THORPE K. E., WOODRUFF R. W., GINSBURG P. B., 2007, “Factors Driving Cost Increases”. Agency for Healthcare Research for Quality, Washington, DC. Disponível em <<http://www.ahrq.gov/news/ulp/costs/ulpcosts1.htm> > acesso em dezembro de 2007.

TUNNICLIFFE, J.C.W., 1980, “A review of operational problems tackled by computer simulation in health care facilities”, *Health and Social Service Journal*, v.18, n<sup>o</sup>.90 (Jul), pp.B73-B80.

VASILAKIS, C., MARSHALL, A.H., 2005, “Modelling nationwide hospital length of stay: opening the black box”, *Journal of the Operational Research Society*, v.56, n.7 (Jul), pp. 862-869.

VILLAMIZAR, J.R., COELLI, F. C., PEREIRA, W.C.A., et al, 2006, “Simulación computacional para la optimización de una clínica de fisioterapia”. In: *XXIX Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica (CNIB)*, pp.60-63, Ixtapa-Zihuatanejo.

VILLAMIZAR, J.R., COELLI, F.C., ALMEIDA, R.M.V.R., et al, 2006, “Modelagem Computacional de uma Clínica de Fisioterapia”. In: *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*”, pp. 677-680, São Pedro, São Paulo, Set.

WEISS S.J., DERLET R., ARNDAHL J., et al., 2004, “Estimating the degree of emergency department overcrowding in academic medical centers: results of the National ED Overcrowding Study”, *Academic Emergency Medicine*, v. 11, n° 1, (Jan), pp. 38-50.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO (2003). *Essential health technologies strategy 2004-2007*. World Health Organization, Genève. Available Internet URL:< [http://www.who.int/ehd/en/EHT\\_strategy\\_2004-2007.pdf](http://www.who.int/ehd/en/EHT_strategy_2004-2007.pdf) >, Acesso em 27 jan 2007.

WILLIAMS S.V., 1983, “How many intensive care beds are enough?”. *Critical Care Medicine*, v.11, n° 6 (Jun), pp. 412-416.

WILSON J.C.T, 1980, “A review of population health care problems tackled by computer simulation”, *Public health*, v.94, n° 3 (May), pp. 174-182.

# Capítulo 8

## Apêndices

### Apêndice 1

#### Artigos publicados como primeiro autor:

- COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R., 2004, “Simulação Computacional de Estratégias de Manutenção de Equipamentos de Mamografia”. In: *IFMBE Proceedings*, v.5, nº 1, pp. 397-400, João Pessoa - PB, Set.
- COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R., 2006, “Simulação por eventos discretos aplicada à otimização do atendimento em uma clínica de mamografia”, *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v.22, nº 3, pp. 203-212.
- COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R., 2007, “Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a

mammography clinic patient flow”. *Computer Methods and Biomedicine Programs*,  
v.87, pp. 201–207.



# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MAMOGRAFIA

F. C. Coelli\*, R. B. Ferreira\*, W. C. A. Pereira\* e R. M. V. R. Almeida\*.

\* Universidade Federal do Rio de Janeiro / Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

e-mail: coelli@peb.ufrj.br

**Abstract:** The elaboration of a maintenance strategy is a main concern for hospital administrators. The strategies can be optimized through computational simulation of discrete events. The objective of this work is to present a model of a standard mammography clinic and to analyze the impact of different mammograph maintenance strategies on the clinic routine. The simulation was implemented in *MedModel* software and it has been tested two basics situations: programmed and not programmed maintenance. The results are presented and these two maintenance situations are discussed as a function of the availability of the mammography equipment and its percentage of effective use.

**Palavras Chaves:** Simulação, Estratégias de manutenção, Engenharia Clínica, Mamografia.

## Introdução

A estratégia de manutenção mais adequada para equipamentos médicos se constitui em um sério problema para os administradores hospitalares [1]. Em geral, esses equipamentos são complexos e necessitam de pessoal qualificado para sua manutenção [2].

A definição dessas estratégias pode ser auxiliada pela construção de modelos empíricos, uma área de pesquisa que vem recebendo atenção crescente. Um exemplo é a utilização de processos de simulação computacional, por exemplo, a chamada “simulação por eventos discretos” [3, 4], assim chamada quando o sistema depende de variáveis que assumem valores discretos, isto é, em um domínio de valores finitos [5].

A simulação de eventos discretos pode ser realizada com o auxílio de diversos *softwares* comerciais, entre eles, o *MedModel* [6, 7], que permite análises de fluxo de pacientes, dimensionamento do quadro funcional e do parque de equipamentos de uma unidade, além de análise das estratégias de manutenção no ambiente hospitalar [8,9, 10].

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de uma clínica de mamografia baseada em um hospital do Instituto Nacional do Câncer e analisar estratégias de manutenção nos aparelhos de mamografia em serviços

do setor, utilizando procedimentos de simulação de eventos discretos.

## Materiais e Métodos

O *layout* do modelo, representado na figura 1, corresponde a uma clínica física do Inca. A clínica é constituída por uma sala de troca, uma de espera, duas de mamógrafo (1 e 2), uma de laudo, uma câmara escura e uma câmara clara. Os trajetos dos médicos, técnicos e pacientes foram definidos de acordo com os caminhos mais comuns, observados no local. Foram consideradas a velocidade média de uma pessoa andando normalmente dentro da clínica, o tempo médio de realização de mamografia, de confecção do laudo, de revelação do filme, de troca de roupas e a taxa de repetição de exames.

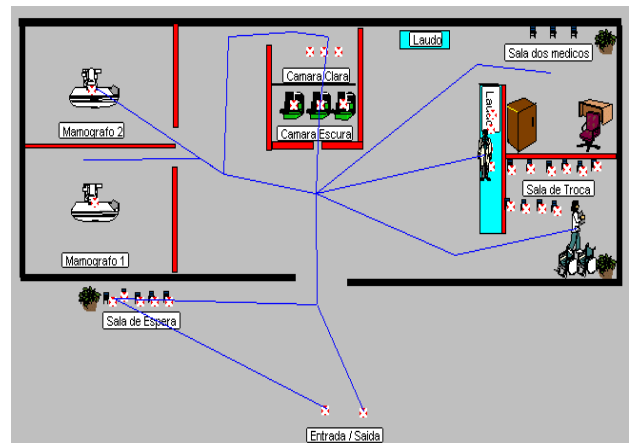


Figura 1: *Layout* da Clínica de Mamografia.

Foram analisadas duas configurações de funcionamento: a primeira com apenas um mamógrafo, e, a segunda, com dois.

O processo de atendimento pode ser resumido da seguinte forma:

Os pacientes oriundos de outros setores do Hospital entram na clínica e aguardam na sala de espera. O técnico conduz o paciente até a sala de troca. Com vestimenta apropriada, o paciente é conduzido até a sala de exames, onde se encontra o mamógrafo. Ao término do exame, o paciente volta para a sala de troca e aguarda sua liberação, caso a mamografia tenha imagem satisfatória. Do contrário, o paciente retorna à sala de exames. O técnico leva o filme sensibilizado pela radiação para revelação na processadora de filmes que se encontra na câmara escura. Após a revelação, ele é levado pelo técnico para a realização do laudo, a ser feito pelo médico.

Na segunda configuração, o paciente é conduzido primeiramente para a sala de exames 1. Caso esteja ocupado, o paciente é conduzido para a sala 2. O resto do procedimento é idêntico ao anterior.

As duas configurações contam com simulações de paradas programadas e não-programadas, com frequência de uma parada por mês, ou a cada 720 horas de funcionamento da clínica. As programadas são aquelas onde o administrador faz a programação previamente para a realização da manutenção preventiva, e as não programadas são realizadas sem que haja agendamento prévio.

As paradas de manutenção seguem uma distribuição normal, com média de 0 (sem desvio padrão) a 1000 minutos (desvio-padrão de 1 minuto). Foram realizadas seis simulações para cada configuração, variando-se o tempo de parada de zero até 5000 minutos, em intervalos de 1000 minutos. O tempo de simulação foi de 16 semanas.

Nas duas configurações manteve-se o mesmo quadro funcional (3 técnicos e 1 médico).

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros adotados no modelo. As capacidades da *fila da sala de espera*, *de troca* e *de exames* são relativas ao número de pacientes permissíveis em cada fila. O valor indefinido é qualquer valor admissível, dentro de valores práticos. As capacidades *da fila da câmara escura* e *da sala de laudos* são relativas ao número de filmes na fila de espera para processamento.

A *média de pacientes por dia* é a quantidade de pacientes que entraram na clínica. *Expediente da clínica* é o período de seu funcionamento. *Pausas programadas* é a parada para o almoço. *Paradas para manutenção* são as paradas programadas ou não, durante as quais se realizam as manutenções dos equipamentos de mamografia. A entrada de pacientes obedece a uma distribuição exponencial, com intervalo entre chegadas de  $\lambda$  minutos. *Velocidade de trânsito* é a velocidade que os médicos, técnicos e pacientes transitam dentro da clínica. *Período de simulação* é o tempo de simulação do modelo.

Com o modelo construído, a duração da parada e do agendamento da manutenção foram alterados a cada rodada de simulação (seis com paradas não-programadas e seis com paradas programadas), aumentando-se o tempo de simulação em 1000 minutos a cada rodada.

Tabela 1. Valores dos Parâmetros do Modelo

Parâmetros do Modelo	Valores
Capacidade da fila Sala de Espera	Indefinido
Capacidade da fila Sala de Troca	Indefinido
Capacidade da fila Câmara escura	Indefinido
Capacidade da fila Sala de Laudos	Indefinido
Capacidade da fila Sala de exames	1
Média de Pacientes / Dia	13
Expediente da Clínica	08:00 às 18:00 hs
Pausas Programadas	12:00 às 13:00 hs
Paradas para Manutenção	1 / mês
Dist. de entrada de Pacientes	Exponencial $\lambda=20$
Velocidade de trânsito	38 metros/ minuto
Taxa de repetição de exames	10%
Período de Simulação	16 semanas

Dois parâmetros foram monitorados durante as simulações: as horas programadas e a utilização do mamógrafo. O primeiro representa o tempo em horas que é preciso manter o mamógrafo disponível para atendimento de um determinado número de pacientes (*horas disponíveis*), e o segundo é o percentual efetivo de utilização do equipamento em cada simulação (*utilização*).

## Resultados

Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos. As informações sobre a configuração 2 são apresentadas como a média aritmética dos valores individuais dos mamógrafos.

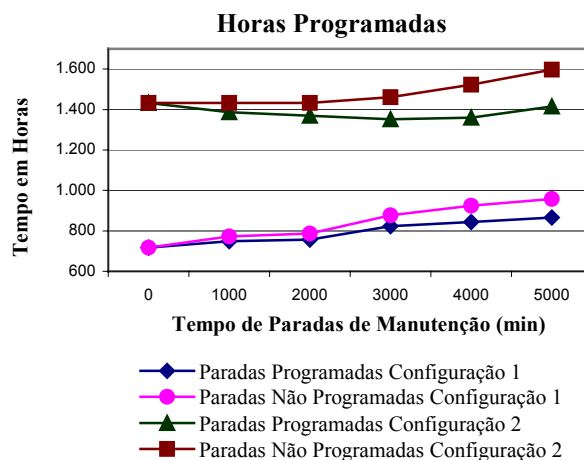


Figura 2: Horas Disponíveis.

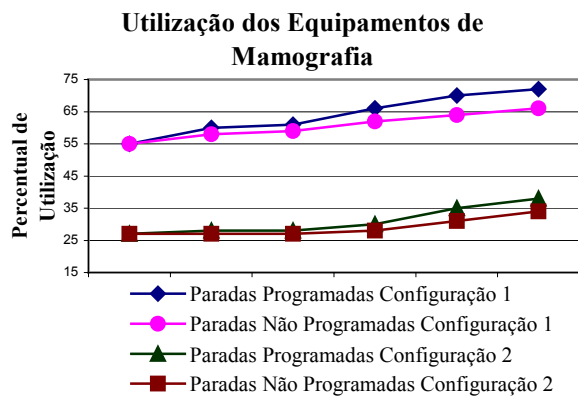


Figura 3: Gráfico da Utilização dos Mamógrafos.

Na figura 2, tem-se a representação gráfica da disponibilidade dos mamógrafos, tempo em horas programadas pelo aumento do tempo de manutenção dos mamógrafos nas duas configurações.

Na figura 3, tem-se o percentual de utilização nas duas configurações. Nas seqüências relativas à segunda configuração, observa-se que o mamógrafo 1 foi utilizado mais vezes, tanto para paradas programadas quanto para não-programadas.

## Discussão e Conclusão

O correto funcionamento de equipamentos de imagem, por exemplo, o mamógrafo, é indispensável para se obter sucesso na detecção precoce do câncer de mama. Faz-se necessário, também, otimizar o tempo despendido em manutenções desses equipamentos, com a finalidade de diminuir a espera dos pacientes.

A simulação por eventos discretos pode ser um importante instrumento para análise de impactos das estratégias de manutenção. A comparação entre as paradas programadas e as não-programadas evidencia os benefícios do agendamento das manutenções.

Todas as rodadas de simulação foram executadas considerando-se o mesmo tempo de aquecimento do gerador de números aleatórios (*warm-up*) e o mesmo número de replicações (3). O tempo de *warm-up* (4 horas) é relativo ao tempo de simulação e foi um valor satisfatório para o modelo.

Assumiu-se uma capacidade ilimitada para a clínica, exceto a sala de exames, com a finalidade de isolar-se o impacto das alterações ocorridas devidas às paradas dos mamógrafos, as únicas contabilizadas no relatório final.

A simulação com um só mamógrafo (configuração 1) mostrou que, para a quantidade de pacientes do modelo seria o suficiente, pois em nenhum momento a sua utilização tornou-se demasiadamente alta. Note-se ainda que a quantidade de pacientes do modelo é inferior à quantidade de pacientes atendidos na Clínica do INCa utilizada como base para a simulação. Nesta configuração observou-se um crescimento do tempo das

horas programadas, tanto para paradas programadas quanto não-programadas. Isto se deveu ao aumento da programação de trabalho do equipamento, uma vez que o tempo de parada para manutenção também aumentou. Além disso, pode-se supor que o tempo programado é maior para paradas não-programadas devido à conseqüente desorganização do atendimento. Assim o sistema aumenta o tempo de trabalho, para atender a quantidade de pacientes previamente determinada. Ou seja, quando a parada é programada, o sistema passa a utilizar o mamógrafo mais intensamente para compensar o tempo de parada.

Na seqüência de dados da configuração 2, o tempo programado e percentual de utilização são apresentados como médias dos valores dos dois mamógrafos. No modelo, o mamógrafo 1 foi mais utilizado devido aos processos estabelecidos no modelo, que indicam esse mamógrafo como o primeiro a ser utilizado, caso os dois estejam desocupados. Com isso, tempo programado e utilização do mamógrafo 1 é conseqüentemente maior. O mesmo raciocínio utilizado na configuração 1 pode ser utilizado para explicar as curvas da configuração 2. Todo aumento de tempo de manutenção reflete no aumento de tempo programado e utilização.

A metodologia apresentada se mostrou muito útil para o gerenciamento de manutenções de mamógrafos, podendo ser estendida para outros equipamentos médicos. Os passos futuros serão a simulação com dados de falhas reais para que se obtenha a projeção de tempo de espera, de utilização e disponibilidade dos equipamentos, visando a definição da estratégia de manutenção.

## Referências

- [1] COELLI F. C., ALMEIDA R.M.V.R., PEREIRA W. C. A., 'Indicadores de Conformidade em um Serviço de Radiologia', Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica 2002, São José dos Campos - SP, 2002.
- [2] COELLI F. C., *Avaliação de desempenho de Aparelhos de Raios-X no Hospital Municipal Miguel Couto, Rio de Janeiro*. Tese de Mestrado, Rio de Janeiro: Programa de Engenharia Biomédica UFRJ/COPPE, 2002.
- [3] AZADIVAR F., SHU J. V., 'Use Of Simulation In Optimization Of Maintenance Policies', *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, Washington, DC, USA, pp 1061-1067, 1998.
- [4] BARTON R. R., 'Designing Simulation Experiments', *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, Arlington, VA, USA, pp 47-52, 2001.
- [5] CASSANDRAS C. G., *Discrete Event Systems: Modelling and Performance Analysis*. Aksen

---

Associates Incorporate Publishers, ISBN:0-256-11212-6, 1993.

- [6] PROMODEL CORPORATION, “*MedModel User’s Guide*”, 2001.
- [7] GROOTHUIS S., VAN MERODE G.G., HASMAN A., ‘Simulation as decision tool for capacity planning’, *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 66:139-151, 2001.
- [8] DENNEY S. H., ‘MedModel® - Healthcare Simulation Software’, *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Atlanta, USA, pp 581-586, 1997.
- [9] PRICE R. N., HARREL, C. R., ‘Healthcare Simulation Modeling and Optimization Using MedModel’, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ, USA, pp 215-219, 1999.
- [10] PRICE R. N., HARREL C. R., ‘Simulation Using Promodel Technology’, *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, USA, pp 192-198, 2002.

**Artigo Original**

Recebido em 10/04/2006 e aceito em 27/12/2006

## **Simulação por eventos discretos aplicada à otimização do atendimento em uma clínica de mamografia**

*Discrete-event simulation models for patient scheduling optimization in a mammography clinic*

**Fernando Cesar Coelli,  
Rodrigo Bouyer Ferreira,  
Renan Moritz Varnier Rodrigues  
de Almeida\*,  
Wagner Coelho Albuquerque Pereira**

Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ  
Caixa Postal 68510  
Cidade Universitária, Rio de Janeiro,  
RJ, Brasil Cep.: 21.941-972  
e-mail: renan@peb.ufrj.br

\*autor para correspondência

### **Resumo**

A simulação por eventos discretos vem sendo utilizada com sucesso na área de Saúde, pois permite a avaliação de cenários alternativos de forma rápida e mínimo custo. Um modelo de clínica de mamografia foi construído a partir de simulação por eventos discretos. O programa utilizado foi o *MedModel*, versão 6.0, da Promodel Corporation (Harrel *et al.*, 2002). O objetivo do trabalho foi analisar o funcionamento da clínica sob diferentes configurações para avaliação da capacidade instalada e apoio na reorganização do atendimento de pacientes. O modelo proposto foi baseado em informações obtidas em uma clínica de mamografia do Instituto Nacional do Câncer (INCa), na cidade do Rio de Janeiro. Foram coletadas informações relativas à capacidade de atendimento da clínica, número de pacientes atendidos por dia, número de profissionais e *layout* da clínica. Três configurações foram simuladas, mantendo-se a estrutura básica (um mamógrafo e um médico) e variando-se somente o número de técnicos de mamografia. O melhor desempenho foi obtido com a configuração 2 (dois técnicos), com uma taxa de chegada de pacientes representada por uma distribuição exponencial de média 29 minutos, atendimento de 15 pacientes/dia, com média de 78 minutos por paciente. A clínica real tem três técnicos e atende 15 pacientes por dia, sem marcação de horário. O modelo, apesar de simples, já indicou alguns resultados importantes, como por exemplo: quinze pacientes podem ser atendidos com dois técnicos; organização da chegada de pacientes por meio de agendamento; possibilidade de taxa de repetição de até 25% (5% ou menos, recomendável pelo *American College of Radiology*), sem que se transfiram pacientes para outros dias. Esses resultados iniciais podem ser alvos de estudos que incluam custo/benefício.

**Palavras-chave:** Capacidade instalada, Eventos-discretos, Mamografia, Simulação, Tecnologia médico-hospitalar.

### **Abstract**

A discrete-events model was implemented to simulate a mammography clinic routine. The objective was to analyze the clinic functioning under different configurations to explore its installed capacity, identify possible obstacles and propose actions to optimize the clinic routine. The methodology consisted in implementing the model based on information collected at the Cancer National Institute (INCa), localized in Rio de Janeiro. The collected information includes number of patients per day, personnel, clinic functioning routine and clinic layout. Three simulation sets [build in *Med-Model* software, Promodel Corporation (Harrel *et al.*, 2002)] were evaluated, each one considering three possible configurations. Each configuration has one mammographic equipment, one medical doctor but a different number of technicians (one, two and three). The simulation indicated that a patient's arrival rate of 29 minutes resulted in the smallest patient's average-time inside the clinic. In terms of cost, the configuration 2 (two technicians) showed the best global result, once its performance indexes are close to the highest capacity configuration (configuration 3), but with one technician less. The model has proved to be a useful tool as a first approach to mammography clinic assessment.

**Keywords:** Discrete-events, Installed capacity, Mammography, Medical-hospital technology, Simulation.

## Extended Abstract

### Introduction

Research on the optimization of health systems performance has experienced great advances with the introduction of computational simulation technologies (Nance, 1993). In the health area, optimization can allow, e.g. the correct dimensioning of staff size and equipment numbers (Groothuis et al., 2001). In radiological clinics, known by their high infra-structure costs, this tool can be used to the optimization of radiological technology use and maintenance cycles (Centeno et al., 2000, Coelli et al., 2004, Azadivar and Shu, 1998).

The objective of the present work was to develop a mammography clinic discrete-event model in order to support its patient flow analysis and optimization.

### The Model

Simulation refers to a model built in order to determine the response of a system to changes in its internal structure and inputs (Law and Kelton, 2000). Usually, it consists of a simplified representation of a dynamic process deemed too complex for direct analysis (Fetter and Thompson, 1965). Thus, the simulation model is smaller, cheaper and simpler, and its purpose is to analyze and understand the behavior of a system as a function of actions and alternative scenarios (Dexter et al., 2003).

The National Cancer Institute of Brazil (INCA) is the agency of the Ministry of Health entrusted with cancer control programs in the country. Five units of the Institute are located in the city of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro State (Brazil). The unit 3 is specialized in breast cancer treatment and diagnostic. This unit has a high patient flow, offering both in-patient and out-patient services. Its mammography clinic consists of a changing room, a mammography viewing room, a staff lounge, a dark camera room and two examination rooms with one mammography machine each (Figure 1). The staff consists of three technicians and two medical radiologists.

The facility system patient flow can be thus described: a patient arrives to the clinic and waits to be called by a technician at an entrance room. The patient is then led to a changing room, and, afterwards, taken to the mammography room, where the exam is performed. At this time, other entity appears in the system, the "X-ray film." A technician takes the film to the dark camera, and, afterwards, places it in a box in the mammography viewing room. At the same time, the patient goes back to the changing room and waits the mammography inspection by a doctor. In case an exam repetition is deemed necessary, the patient is again taken to the exam room. If the mammography is considered satisfactory, the patient is discharged. The mammography is then stored in a film deposit.

### Materials and Methods

The model was implemented in MedModel software 6.0 (Promodel Corp.). The parameter values (Table 1) for the present model were obtained by field measurements, interviews with managing personnel or from the literature. The parameters waiting room capacity, changing room capacity, dark camera capacity and mammography viewing room capacity were assigned **undefined** values, meaning that they may take any value without interfering with the model results. The capacity of the mammography room was assigned value one, since only one patient is attended each time. Average of patients/day is the expected number of patients per day, in this case, 15. Working time of the clinic is the time during which the clinic locations are available to receive entities. Patient arrival distribution is the patient rate of arrival, assumed as exponential with arrivals varying between every 15 and 35 minutes.

Three simulation cycles were developed for the model clinic, with each cycle consisting of 100 simulations. Analyzed parameters included the average time (min) from patient arrival until discharge, the blocked time (time a patient was in wait for a resource (e.g. an exam room), physician utilization (PU), technical utilization (TU) and mammography equipment utilization (EU), the percent of equipment operation time (OP), the percent

of available equipment time (DI), the waiting time until use of an equipment (ES) and the number of patients that could not be attended in a specific day (remaining patients - RE). The first cycle tried to determine the best patient arrival rate, that is, the rate that would allow for the minimum stay-time for a patient inside the system for a certain configuration. Three configurations for clinic were simulated: configuration 1, with one doctor and one mammography technician; configuration 2 with one doctor and two technicians and configuration 3, with one doctor and three technicians. Each configuration had arrival rates following exponential distributions with averages between 15 and 35 min in 2 min increments. In the second simulation group, assuming the arrival rates optimized as above, the model tried to determine what would be the maximum number of patients that would still be possible to attend, considering the existing clinic capacity. Three configurations were simulated, increasing the number of patients/day and using as stop criterion the point in which excluded patients were detected, that is, the point when the system was saturated (unable to receive new patients). In the third group, exam repeat rates were used to estimate the impact of the equipment operation conditions on the system. In this case, the simulation also used "optimum" arrival rates obtained as before.

### Results

Table 3 shows the impact of patient arrivals rate in the clinic configurations. The shorter time inside the clinic is verified with arrival rate in intervals of 29 minutes [E(29)]. Table 4 shows the patient average time in the system (minutes) as a function of the increase in the number of patient arrivals. A considerable increase in the patient's length of stay could be verified when patient arrivals rose above 15 patients/day (configurations 1 and 2) and 17 patients/day (configuration 3). Beyond this point, some patients could not be attended (excluded patients).

Table 5 shows the impact of the exam repeat rates over the patient's length of stay for all configurations, the rate of excluded patients and the rates of personnel (physicians and technicians) occupation. The largest length of stay takes place in configuration 1, which also has the largest rate of personnel occupation. Configuration 1 shows patient block time 40% higher than the other configurations with exam repeat rate of 20%.

### Discussion and Conclusion

Although referring to a hypothetical simulation, useful information can be obtained from such modeling exercises.

According to the first group of simulations, the shorter patient length of stay was obtained when the patient's arrival rate followed an exponential distribution with an average of 29 minutes. Receiving patients at this rate, the time inside clinic is the shortest.

In the second group, the installed capacity was evaluated. It could be seen that, keeping the patient's arrival rate of 29 minutes, configurations 1 and 2 showed the maximum attendance capacity of 15 patients/day and while configuration 3 resulted in 17 patients/day.

In the third group, the repeat-exam rate impact was evaluated. This impact is progressively critical, because it increases patient average time inside clinic, as well as blocked time percentage and personnel utilization. It was shown that after 25% repeat rate the average time inside the clinic doubles and performance decreases rapidly.

A global analysis of the simulation results indicated two feasible configurations, 2 and 3. In terms of cost, the second configuration (two technicians) showed the best global result, once its performance indexes are close to the highest capacity configuration (configuration 3), but with one technician less. In terms of capacity configuration 3 was able to attend 17 patients/day, having the smallest average time inside clinic for all repeat rates tested.

The general conclusion to be drawn from these simulations is that the actual capacity of the clinics is over-dimensioned for its present demand. Thus, it can be concluded that the computer simulation showed to be a useful tool to analysis standard clinic.

## Introdução

A pesquisa voltada para otimização de Sistemas de Saúde tem experimentado importantes avanços com a utilização da simulação computacional (Nance, 1993). Suas aplicações mostram que um melhor planejamento pode ser alcançado utilizando essa ferramenta (Dean *et al.*, 1999, Paul *et al.*, 1998, Samaha e Armel, 2003). Na área hospitalar, a otimização pode trazer impactos positivos ao setor administrativo e operacional, como, por exemplo, permitir o correto dimensionamento do quadro profissional e do número ideal de equipamentos (Groothuis *et al.*, 2001). Já os pacientes beneficiam-se, por exemplo, da redução do tempo de espera na clínica (ou no setor), sem perda de qualidade do serviço.

Em clínicas de radiologia, conhecidas pelo volume de investimentos em infra-estrutura, essa ferramenta pode ser usada para otimização do uso da tecnologia (Centeno *et al.*, 2000). Por meio de estudos de simulação pode-se, por exemplo, estimar a capacidade instalada de uma clínica a ser construída. A simulação também pode ser útil para estimar o impacto da indisponibilidade dos ciclos de manutenção (preventiva e/ou corretiva) dos equipamentos usados no ambiente hospitalar (Azadivar e Shu, 1998, Coelli *et al.*, 2004).

Em clínicas de mamografia, por exemplo, a rotina de funcionamento é função do número de profissionais, número de equipamentos, capacidade das salas e também dos processos inerentes a cada tarefa do atendimento. Além disso, a infra-estrutura desses serviços deve obedecer aos critérios normativos de funcionamento e padrões pré-determinados em lei (Ministério da Saúde, 1998).

Este trabalho tem como objetivo propor e analisar um modelo por eventos discretos, do funcionamento de uma clínica de mamografia, para apoio na reorganização do atendimento de pacientes e avaliação da capacidade instalada, aceitando-se que os recursos tecnológicos estejam dentro dos padrões normativos. Utiliza-se uma clínica de mamografia de um hospital público da cidade do Rio de Janeiro como fonte de informações básicas para essa modelagem.

## Simulação Computacional

A simulação é um processo de experimentação que utiliza um modelo suficientemente detalhado de um sistema para determinar como este responderá às mudanças em sua estrutura, ambiente ou condições de contorno (Cassandras e Lafortune, 1999). Geralmente o termo simulação refere-se à representação de um processo dinâmico ou sistema de forma a permitir sua

análise, por considerar o problema atual muito grande e/ou complexo (Harrel *et al.*, 2002).

Assim, a utilização de modelos em simulação é, em geral, mais simples e barata que a simulação com o sistema real. Em muitos casos seu propósito é analisar e entender o comportamento do sistema em função de cenários alternativos (Law e Kelton, 2000). Portanto, uma vantagem importante da simulação é a flexibilidade de avaliar situações, pelo mesmo modelo, pois a avaliação de vários cenários “reais” levaria muito mais tempo e seria excessivamente dispendiosa.

Em simulação por eventos discretos, as variáveis devem ser equacionadas em um modelo, onde os objetivos são otimização do uso da tecnologia e o atendimento de pacientes, considerando que todos aspectos legais sejam cumpridos. Simulação por eventos discretos quer dizer que uma determinada variável sofre variações discretas em seu valor. Simulação dessa natureza apresenta-se como uma importante ferramenta para o levantamento da contribuição individual de cada parcela no processo (Dexter *et al.*, 2003, Fetter e Thompson, 1965), caracterizando estados que descrevem o processo com instâncias observáveis através do modelo.

## O Modelo de Clínica de Mamografia

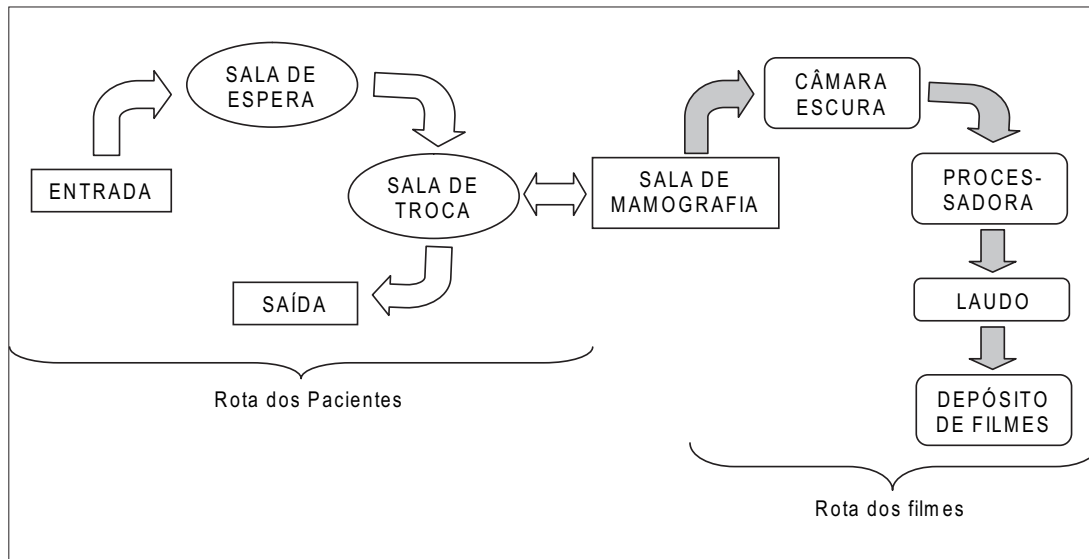
O modelo baseou-se em informações obtidas a partir de visitas e entrevistas com os funcionários em uma clínica de mamografia do Instituto Nacional do Câncer (INCa), na cidade do Rio de Janeiro (apenas a velocidade de trânsito foi referenciada na literatura).

A abordagem aqui adotada é orientada ao paciente, ou seja, estes são considerados as elementos principais do modelo, em torno dos quais atividades, eventos e processos são organizados.

No modelo de simulação por eventos discretos construído a partir da plataforma *MedModel*, os elementos são divididos em grupos chamados de *recursos*, *entidades*, *locais*, *processos* e *atributos*. No presente caso, os “recursos” são os técnicos de mamografia e médicos, as “entidades” são os pacientes e filmes radiografados, “locais” são as salas da clínica e os “processos” são as rotinas entre locais, recursos e entidades. Os “atributos” são os possíveis estados das entidades, por exemplo: bom ou ruim. Os períodos de tempo de cada parte do processo são colocados nas programações de rotinas do modelo.

As trajetórias das entidades (paciente e filme) podem ser vistas no fluxograma da Figura 1.

Seguindo a Figura 1, o fluxo de atendimento pode ser descrito como: paciente chega à clínica e espera



**Figura 1.** Fluxograma da trajetória das entidades (pacientes e filmes) na Clínica.

**Figure 1.** Clinic flow chart of entities (patients and films) trajectories.

para ser chamado pelo técnico junto à porta da entrada. Ao ser chamado, é encaminhado para sala de troca onde, após vestir trajes apropriados, também aguarda a vez de ser encaminhado para a sala de mamografia. Caso esteja disponível, o técnico leva o paciente para a sala de mamografia onde o exame é realizado. Neste momento, outra entidade aparece no sistema, o “filme radiografado”. O técnico leva o filme para a câmara escura para revelação. O filme é, em seguida, colocado na caixa coletora, na sala de laudos. O paciente volta para a sala de troca, onde aguarda a inspeção da mamografia pelo médico. Caso necessite repetir o exame, a paciente é novamente conduzida para sala de mamografia. Se a mamografia for considerada satisfatória, o paciente é liberado, levando consigo o laudo. A mamografia fica armazenada no depósito de filmes, para estudos futuros.

A liberação do paciente está condicionada à aprovação do médico. Depois de realizado o exame, o prontuário do paciente é totalmente preenchido e uma cópia é enviada para o setor solicitante e a outra segue com o paciente.

### Metodologia

O modelo foi desenvolvido utilizando o pacote *Med-Model*, versão 6.0 da *ProModel Corporation*. Apesar de existirem vários *softwares* de simulação, o *MedModel* foi escolhido devido ao seu custo, capacidade de interação com outros aplicativos e facilidade de apresentação de resultados.

O processo de modelagem deste trabalho segue as etapas sugeridas por Law e Kelton (2000), onde os passos são planejamento do estudo, coleta de dados e definição do modelo, construção do modelo computacional, validação do modelo, experimentação (propostas e execução), análise de dados de saída, documentação e implementação.

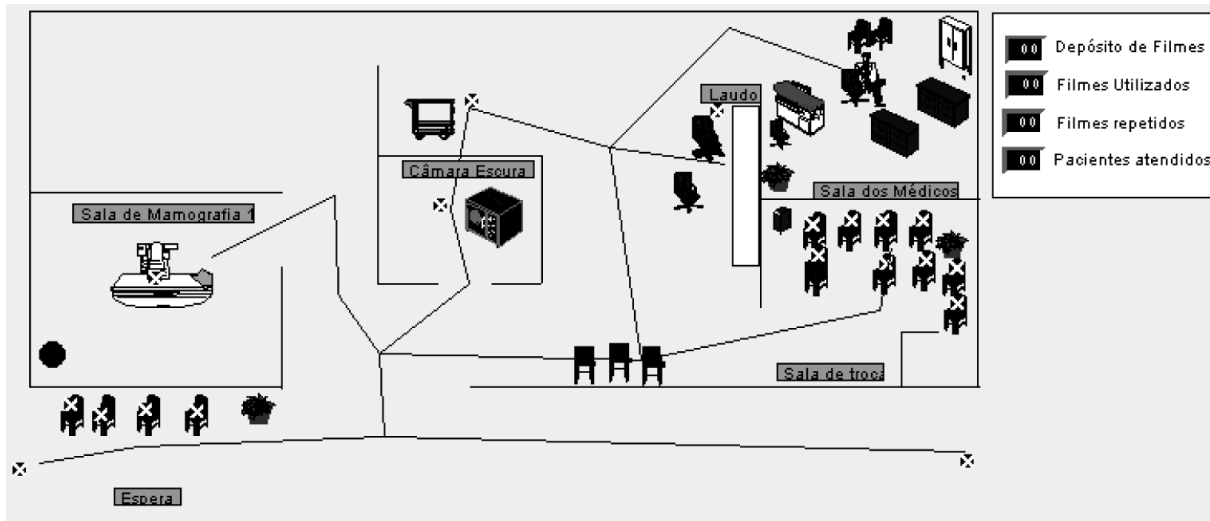
Como dito, a clínica é composta de sala de espera, de troca, laudos, mamografia e câmara escura. A distribuição física da clínica pode ser visualizada na Figura 2.

A Figura 2 mostra, além do *layout* da clínica, um painel com os valores de filmes no depósito (total de filmes armazenados na clínica), filmes utilizados, filmes repetidos e pacientes atendidos. Esses valores são úteis para e avaliação instantânea do modelo durante seu processo de desenvolvimento. O modelo utiliza distribuições de probabilidade para a aceitação do filme radiografado.

Os parâmetros de entrada do modelo podem ser vistos na Tabela 1.

Para o desenvolvimento de simulação computacional é necessário atribuir valores aos parâmetros de entrada do modelo. Conforme mencionado anteriormente, todos os valores dos parâmetros da Tabela 1 foram coletados na clínica por entrevistas, exceto a *Velocidade de trânsito*. Para os parâmetros *Capacidade da Sala de Espera*, *Capacidade Sala de Troca*, *Capacidade da Câmara escura*, *Capacidade da Sala de Laudos*, que são relativos às capacidades destes locais, foi atribuído





**Figura 2.** Modelo de Layout da Clínica de Mamografia.  
**Figure 2.** Layout model for mammographic clinic.

valor infinito, indicando que há uma elevada capacidade destes locais e que não são limitantes para funcionamento do modelo. É uma possibilidade existente no *software* para que este parâmetro não interfira no andamento da simulação. Já o parâmetro *Capacidade da Sala de Mamografia* precisa ser definido, ou seja, o local onde se encontra o equipamento de mamografia só pode comportar um único paciente por vez. A *Média de Pacientes/Dia* é o número de pacientes programados para serem atendidos por dia, que, neste caso, é 15. O *Expediente da Clínica* é o tempo que os locais ficarão disponíveis para receber as entidades e o tempo necessário para os recursos trabalharem. *Pausas* são paradas

nas quais os recursos e locais ficam indisponíveis para uso (neste caso, paradas para o almoço de uma hora). Os parâmetros *Tempos na Sala de Espera*, *Tempo na Sala de Troca* e *Tempo na Sala de Mamografia* são os valores médios de tempo que o paciente permanece ou transita dentro de cada local. Esses valores foram obtidos por entrevistas com os profissionais da clínica. A *Distribuição de entrada de Pacientes* é a taxa de chegada de pacientes no modelo. Foram utilizadas distribuições exponenciais com médias que variaram entre 15 a 35 minutos para chegadas de pacientes. *Velocidade de trânsito* é a velocidade com que recursos e entidades se movem dentro do modelo. O valor de 38 m/min ado-

**Tabela 1.** Parâmetros do Modelo. **Table 1.** Model Parameters.

Parâmetros do Modelo	Valores
Capacidade da fila Sala de Espera	Infinito
Capacidade da fila Sala de Troca	Infinito
Capacidade da fila Câmara escura	Infinito
Capacidade da fila Sala de Laudos	Infinito
Capacidade da fila Sala de Mamografia	01 lugar
Média de Pacientes/Dia	13 a 18 (detalhes Tabela 2)
Expediente da Clínica	08:00 às 18:00 horas
Pausas (intervalo para almoço)	12:00 às 13:00 horas
Tempo na Sala de Espera	48 segundos
Tempo na Sala de Troca	N (3,1) minutos
Tempo na Sala de Mamografia	N (20,2) minutos
Distribuição de entrada de Pacientes	Exponencial
Velocidade de trânsito	38 metros/minuto
Taxa de repetição de exames	0% 5% 10% 15% 20% 25% (ver Tabela 5)
Número de Técnicos em mamografia	1 a 3 (detalhes Tabela 2)
Número de médicos	1
Período de Simulação	1 semana (segunda a sexta-feira)

tado neste trabalho (velocidade média de uma pessoa caminhando) segue a referência do *MedModel User Guide* (Promodel, 2002). A *Taxa de repetição de exames* é o valor percentual de exames que são repetidos em relação ao total de exames. *Período de Simulação* é o período de tempo em que o modelo executa os processos (neste caso, uma semana, excluindo-se sábado e domingo).

As informações explicitadas anteriormente e utilizadas para construção do modelo da clínica são resultado de pesquisa sistemática de coleta de dados durante um mês. Os parâmetros relacionados ao tempo de espera foram obtidos pela medição de tempo e validação empírica baseada na experiência dos funcionários. Os outros parâmetros foram obtidos por formulários de atendimento de pacientes e documentos internos de funcionamento da clínica.

A Tabela 2 apresenta os três conjuntos de simulações, cada um com três configurações onde se varia o número de técnicos e/ou de pacientes. Cada conjunto teve um objetivo específico.

O primeiro conjunto de simulações (Tabela 2) teve como propósito determinar qual a taxa de chegada mais adequada para que o paciente permaneça menos tempo no sistema, variando o número de técnicos de mamografia. O número de pacientes por dia é fixado em 15 (valor usado na clínica). Três configurações do modelo foram simuladas. *Configuração 1* com um

médico e 1 técnico de mamografia; *configuração 2* com um médico e dois técnicos e *configuração 3*, com um médico e três técnicos. Nesta configuração não há repetição de exames. Foi obtida uma taxa ótima de chegada de pacientes (que é o tempo médio entre a chegada de dois pacientes) para cada configuração. Foi observado o tempo de permanência (TP) no sistema, que é a média de tempo (em minutos) desde a chegada do paciente na clínica até sua saída. Além do TP, foram observados o tempo bloqueado (TB), a utilização do médico (UM), a utilização do técnico (UT) e a utilização do equipamento de mamografia. Tempo bloqueado é o tempo que o paciente ficou parado esperando pela liberação de uma sala ou um profissional.

No segundo conjunto, o modelo conta com a taxa de chegada de pacientes otimizada pelo primeiro conjunto de simulações e avalia a capacidade instalada para cada configuração para atendimento de um número crescente de pacientes/dia. Além do tempo de permanência do paciente (TP), foram observados o tempo bloqueado do paciente (TB), o percentual do tempo em que o equipamento ficou em operação (OP), o percentual de tempo que o equipamento ficou disponível para uso (DI), o percentual de tempo que o equipamento ficou a espera de técnicos e pacientes (ES) e o número de pacientes remanescentes (RE). As configurações foram simuladas até apresentar pacien-

**Tabela 2.** Conjunto de simulações realizadas e respectivas configurações. **Table 2.** Simulation groups and respective configurations.

Conjuntos	Configurações	Parâmetros de entrada variáveis	Parâmetros de saída analisados
Primeiro	1	1 técnico, 15 pacientes/dia, sem índice de repetição	Tempo de permanência - TP
	2	2 técnicos, 15 pacientes/dia, sem índice de repetição	Tempo bloqueado - TB Utilização do médico - UM Utilização do técnico - UT
	3	3 técnicos, 15 pacientes/dia, sem índice de repetição	Utiliz. do equipamento - EU
Segundo	1	1 técnico, 13 a 18 pacientes/dia, sem índice de repetição	Tempo de permanência - TP Tempo bloqueado - TB
	2	2 técnicos, 13 a 18 pacientes/dia, sem índice de repetição	Equipamento em Operação -OP Equipamento Disponível - DI Equipamento em Espera - ES
	3	3 técnicos, 13 a 18 pacientes/dia, sem índice de repetição	Pacientes remanescentes - RE
Terceiro	1	1 técnico, 15 pacientes/dia, com índice de repetição	Tempo de permanência - TP Tempo bloqueado - TB
	2	2 técnicos, 15 pacientes/dia, com índice de repetição	Utilização do médico - UM Utilização do técnico - UT
	3	3 técnicos, 15 pacientes/dia, com índice de repetição	Utiliz. do equipamento - UE Pacientes remanescentes - RE

tes remanescentes, ou seja, pacientes que não puderam ser atendidos dentro daquele período. Neste conjunto também não se considerou a repetição de exames.

No terceiro conjunto, o modelo conta com índices de repetição de exames, sendo mostrado seu impacto nas três configurações. O modelo foi simulado com as configurações otimizadas pelas simulações anteriores e possui taxa de chegada de 15 pacientes/dia. No modelo foram observados o tempo de permanência (TP) e o tempo bloqueado dos pacientes (TB), o percentual do tempo que o equipamento ficou em operação (OP), o percentual de tempo que o equipamento ficou disponível para uso (DI), o percentual de tempo que ficou em espera até ser usado (ES) e o número de pacientes remanescentes (RE). As configurações foram simuladas até apresentar pacientes remanescentes.

### Resultados

A Tabela 3 mostra o impacto da variação da taxa de chegadas de pacientes nas configurações da clínica. Pode ser observado pelos parâmetros Tempo de

Permanência (TP) e Tempo de bloqueio (TB), que as Configurações 2 e 3 apresentaram desempenhos semelhantes para todas as taxas de chegada de pacientes (coluna 1 da Tabela 3). O menor tempo (TP) de um paciente dentro da clínica é verificado quando a taxa de chegadas é em intervalos de 29 minutos [E(29)] para as três configurações. Verificou-se também que, em geral, o tempo na sala de espera segue uma distribuição normal, conforme observado na prática.

A Tabela 4 apresenta a variação do tempo (em minutos) de permanência do paciente (TP) na clínica em função do aumento do número de chegadas de pacientes nas três configurações (coluna 1 da Tabela 4). Observa-se que começa a haver pacientes remanescentes (RE), quando se ultrapassa 15 pacientes/dia nas configurações 1 e 2, e 17 na 3.

A Tabela 5 mostra o impacto do atendimento na clínica, considerando os índices de repetição de exames. Neste modelo não é necessário supor um motivo específico para a repetição de exames. Na configuração 1, o tempo de permanência (TP) apresenta-se elevado

**Tabela 3.** Otimização da taxa de chegadas de pacientes na Clínica. **Table 3.** Patients arrivals rate optimizing clinic.

Taxa de Chegadas	Configuração 1					Configuração 2					Configuração 3				
	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	UE (%)	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	UE (%)	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	UE (%)
15	146	44	57	69	71	113	73	57	34	66	113	74	57	23	65
17	137	46	57	70	71	106	71	57	34	65	104	70	57	22	65
19	128	47	57	70	71	98	67	57	34	65	97	68	57	23	65
21	119	47	57	70	71	91	65	57	33	65	92	65	57	23	65
23	112	47	57	70	71	87	62	57	34	64	87	63	57	23	65
25	106	47	57	70	72	83	59	57	34	64	81	60	57	23	65
27	105	46	57	69	72	81	57	57	34	65	81	58	57	23	65
29	100	45	57	69	72	78	54	57	34	65	76	53	57	23	65
31	103	43	57	69	72	82	52	57	34	66	78	53	57	23	66
33	108	40	57	69	73	85	48	57	34	67	85	48	57	23	66
35	117	40	57	69	74	93	44	57	33	67	88	45	57	23	68

TP: Tempo de permanência do paciente, TB: Tempo de bloqueio do paciente, UT: Utilização do técnico, UE: Utilização do equipamento, UM: Utilização do Médico.  
TP: Average time patient inside clinic, TB: Patient blocked time, UT: Technical utilization, UM: Physician utilization, UE: Equipment utilization.

**Tabela 4.** Avaliação da Capacidade Instalada. **Table 4.** Evaluation installed capacity.

Taxa de chegadas	Configuração 1						Configuração 2						Configuração 3					
	TP (min)	TB (%)	OP (%)	DI (%)	ES (%)	RE	TP (min)	TB (%)	OP (%)	DI (%)	ES (%)	RE	TP (min)	TB (%)	OP (%)	DI (%)	ES (%)	RE
13	88	41	46	37	15	0	70	52	46	43	9	0	70	53	47	44	9	0
14	93	44	48	33	18	0	76	54	49	39	11	0	74	53	49	38	11	0
15	100	45	49	28	22	0	78	54	51	34	14	0	76	53	51	34	14	0
16	115	48	46	21	32	2	88	55	51	29	19	2	87	54	51	29	18	0
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98	57	50	24	25	0
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	108	56	48	19	32	2

TP: Tempo de permanência do paciente, TB: Tempo de bloqueio do paciente, OP: Tempo percentual do equipamento em Operação, DI: Tempo percentual disponível, ES: Tempo percentual do equipamento em espera, RE: Número de pacientes remanescentes. TP: Average time patient inside clinic, BT: Blocked time, OP: Equipment time percentage in operation, DI: Equipment time percentage available, ES: Equipment time percentage waiting, RE: Number of remaining patients.

**Tabela 5.** Impacto do Índice de Rejeição. **Table 5.** Repeat rate impact.

Ind. Rep. (%)	Configuração 1						Configuração 2						Configuração 3					
	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	UE (%)	RE	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	EU (%)	RE	TP (min)	TB (%)	UM (%)	UT (%)	EU (%)	RE
0	100	45	57	69	71	0	79	54	57	34	65	0	79	54	57	34	65	0
5	114	48	59	73	76	0	87	57	60	35	69	0	88	56	60	24	68	0
10	137	53	61	75	79	0	97	59	62	37	72	0	97	60	62	24	72	0
15	159	56	64	78	85	0	105	60	65	38	76	0	109	61	65	26	76	0
20	186	61	66	81	87	1	122	64	68	40	80	0	120	65	68	27	79	0
25	222	66	68	84	90	2	131	67	70	41	82	0	138	68	70	28	83	0

TP: Tempo de permanência do paciente, TB: Tempo de bloqueio do paciente, UM: Utilização do médico, UT: Utilização do técnico, EU: Utilização do equipamento.  
 TP: Average time patient inside clinic, TB: Patient blocked time, UT: Technical utilization, UM: Physician utilization, UE: Equipment utilization.

se comparado com as outras configurações. Para o mesmo índice de rejeição, por exemplo, 20%, a *configuração 1* apresenta um tempo de paciente bloqueado (113 minutos) cerca de 31% maior que as outras duas configurações (≈78 minutos em ambas).

### Discussão e Conclusão

Muitos trabalhos mostram a aplicabilidade da ferramenta de simulação na área de saúde, por exemplo, Anderson (2003), Garcia *et al.* (1995), Samaha e Armel (2003). Ela pode ser usada para avaliar situações de sistemas que ainda serão implementados, otimizar sistemas já em operação e, ainda, analisar cenários alternativos (Caloba *et al.*, 2003; Hirshberg *et al.*, 1999; Winamaki e Dronzek, 2003).

Samaha e Armel (2003) realizaram um estudo em um departamento de emergência utilizando a simulação computacional. O objetivo foi avaliar as possíveis alternativas para redução do tempo de espera de pacientes. Segundo os autores, a simulação se mostrou útil para a avaliação de tempo de espera dentro do departamento de emergência.

Centeno *et al.* (2000) apresentam um estudo de otimização de um departamento de radiologia do *Jackson Memorial Hospital* nos Estados Unidos. Foram avaliados os procedimentos radiológicos sob diferentes cenários (variando-se os números de profissionais envolvidos, alterações no *layout* do departamento e acrescentando mais um dia no atendimento de pacientes). Buscou-se identificar o impacto de alterações na conduta de atendimento como aumento de salas e dias de atendimentos. Segundo os autores, a configuração com um técnico foi a de melhor relação custo-benefício.

Semelhante aos trabalhos discutidos anteriormente, este utiliza uma mesma ferramenta de modelagem (*MedModel*) a partir de dados reais e avaliações em diferentes cenários (variando-se o número de profis-

sionais). As contribuições específicas deste trabalho são a identificação da melhor taxa de chegadas de pacientes, a capacidade instalada e o impacto da rejeição de filmes.

A coleta de informações se deu de forma sistemática durante quatro semanas e o modelo foi concebido de forma a representar a clínica. Nesta etapa foram ainda realizadas as primeiras validações empíricas do modelo.

A Tabela 1 apresenta valor *Infinito* para as capacidades da Sala de Espera, Troca, Câmara Escura e Sala de Laudos. Além de ser uma possibilidade do *software* de simulação, ela indica que estes locais não são críticos para o modelo, ou seja, a clínica apresenta capacidade suficientemente grande para comportar os pacientes que chegarem, sem interferir no funcionamento da clínica.

A simulação mostrou que a melhor taxa de chegadas de pacientes para as configurações da clínica modelada foi uma exponencial com 29 minutos de média, apresentada na Tabela 3. Recebendo pacientes com essa taxa, o seu tempo de processamento seria otimizado, ou seja, seria dispendido o menor tempo possível dentro da clínica. Pode-se observar que o fator decisivo para escolha das alternativas de configuração se deve ao tempo de espera do paciente, pois os outros parâmetros (UM, UT e UE) não indicam restrição para o atendimento. Neste caso, não foi considerado o índice de rejeição de filmes.

No segundo conjunto, a capacidade instalada para o atendimento da clínica é avaliada, com taxas de chegada ajustadas a partir dos resultados do primeiro conjunto. Foram simuladas as configurações 1 e 2 quatro vezes e a configuração 3 seis vezes, até que surgissem pacientes remanescentes (não atendidos por falta de tempo). Verificou-se que, para as configurações 1 e 2, a capacidade máxima de atendimento é de 15

pacientes/dia e para configuração 3, 17 pacientes/dia. Observa-se que o tempo de espera do paciente dentro da clínica varia pouco entre as configurações 2 e 3. O número máximo de atendimentos indica o ponto de equilíbrio da clínica, observando questões relacionadas à qualidade de atendimento. Neste caso, o ponto de equilíbrio é o número de pacientes que podem ser atendidos, considerando a taxa real de repetição e evitando que pacientes retornem sem atendimento, assegurando ainda um tempo de espera tolerável.

Apesar de representar uma falha do sistema, a rejeição é comumente verificada em clínicas de radiologia. O *American College of Radiology* (1998) recomenda que o índice de rejeição seja menor que 5%. Este índice encerra os vários fatores que culminam na rejeição do filme. Entre os motivos mais comuns estão erro de posicionamento de paciente, baixa qualidade de imagem, artefatos na imagem, técnica radiográfica empregada e problemas com a revelação do filme. No terceiro conjunto de simulações, o impacto dos percentuais de rejeição de filmes foi avaliado. Nota-se que este impacto é progressivamente crítico, pois além de aumentar o tempo de espera do paciente, aumenta o seu tempo de bloqueio e a taxa de utilização de profissionais e equipamentos da clínica.

Como conclusão, pode-se afirmar que melhor desempenho foi obtido com a configuração 2 (dois técnicos), com uma taxa de chegada de pacientes representada por uma distribuição exponencial de média 29 min., atendimento de 15 pacientes/dia, com média de 78 min. de atendimento por paciente. A clínica real tem três técnicos e atende 15 pacientes por dia, sem marcação de horário. O modelo, apesar de simples, indicou resultados importantes, como por exemplo: capacidade de atendimento de quinze pacientes com dois técnicos; organização da chegada de pacientes por meio de agendamento; possibilidade de taxa de repetição de até 25% (5% a 8% no caso real), atendendo sem prejuízo do número de pacientes atendidos por dia. Além disto, esses resultados servem de base para estudos mais abrangente que incluam conceitos de custo, benefício e qualidade de atendimento.

### Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro através de bolsas de fomento tecnológico, às quais os autores são gratos.

### Referências

- American College of Radiology (1999), *Mammography quality control manual*, Reston: ACR (Committee on Quality Assurance in Mammography).
- Anderson, J.G. (2003), *Simulation in the health services and biomedicine*, Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers.
- Azadivar, F., Shu, J.V. (1998), "Use of simulation in optimization of maintenance policies", In: *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference [WSC'98]*, Washington DC, p. 1061-1067, 11-16 Dec.
- Caloba, G.M., De Oliveira, M.J.F., Lopez, M.G., Leventhal, G., Figueiredo, C.H.D.V. (2002), "Simulação do setor de maternidade de um hospital público da cidade do Rio de Janeiro", In: *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, p. 1-1, 11-13 Oct.
- Cassandras, C.G., Lafortune, S. (1999), *Introduction to discrete event systems*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Centeno, M.A., Albacete, C., Terzano, D.O., Carrillo, M., Ogazon, T. (2000), "A simulation study of the Radiology Department at JMH", In: *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference [WSC 00]*, Orlando, v. 2, p. 1978-1984, 10-13 Dec.
- Coelli, F.C., Ferreira, R.B., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R. (2004), "Simulação computacional de estratégias de manutenção de equipamentos de mamografia", In: *Anais do XIX Brazilian Congress on Biomedical Engineering, III Congresso Latino Americano de Engenharia Biomédica [CLAEB'2004]*, João Pessoa, Brasil, v. 5, p. 397-400, 22-25 Sep.
- Dean, B., van Ackere, A., Gallivan, S., Barber, N. (1999), "When should pharmacists visit their wards? An application of simulation to planning hospital pharmacy services", *Health Care Management Science*, v. 2, n. 1, p. 35-42.
- Dexter, F., Macario, A., Traub, R.D., Lubarsky, D.A. (2003), "Operating room utilization alone is not an accurate metric for the allocation of operating room block time to individual surgeons with low caseloads", *Anesthesiology*, v. 98, n. 5, p. 1243-1249.
- Fetter, R.B., Thompson, J.D., (1965), "The simulation of hospital systems", *Operations Research*, v. 13, n. 5, p. 689-711.
- Garcia, M., Centeno, M.A., Rivera, C., De Carlo, N. (1995), "Reducing time in an emergency room via a fasttrack", In: *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference [WSC'95]*, Arlington, p. 1048-1053, 03-06 Dec.
- Groothuis, S., van Merode, G.G., Hasman, A. (2001), "Simulation as decision tool for capacity planning", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v. 66, p. 139-151.
- Harrel C.R., Mott, J.R.A., Bateman, R.E., Bowden, R.G., Gogg, T.J. (2002), *Simulação Otimizando os Sistemas*, São Paulo: Belge IMAM.
- Hirshberg, A., Stein, M., Walden, R. (1999), "Surgical resource utilization in urban terrorist bombing: a computer simulation", *The Journal of Trauma*, v. 47, n. 3, p. 545-550.
- Law, A.M., Kelton, W.D. (2000), *Simulation Modeling and Analysis*, Boston: McGraw-Hill.
- Ministério da Saúde (1998), Secretaria de Vigilância Sanitária, "Diretrizes de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico", Portaria nº 453/1998.
- Nance, R.E. (1993), *A History of Discrete Event Simulation Programming Languages*, New York: ACM Press.

Paul, R.J., Hlupic, V., Giaglis, G.M. (1998), "Simulation modeling of business processes", In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> UK Academy of Information Systems Conference*, Lincoln, 11-13 Jun.

Promodel (2002), *MedModel Users Guide*, Promodel Corporation, Utah, USA.

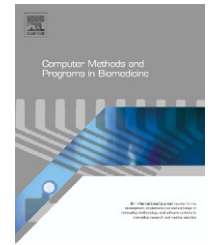
Samaha, S., Armel, W.S. (2003), "The use of simulation to

reduce the length of stay in an emergency department", In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference [WSC'03]*, New Orleans, p. 1907-1911, 07-10 Dec.

Winamaki, A., Dronzek, R. (2003), "Using simulation in the architectural concept phase of an emergency department design", In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference [WSC'03]*, New Orleans, p. 1912-1916, 07-10 Dec.



ELSEVIER

journal homepage: [www.intl.elsevierhealth.com/journals/cmpb](http://www.intl.elsevierhealth.com/journals/cmpb)

# Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow

Fernando C. Coelli, Rodrigo B. Ferreira, Renan Moritz V.R. Almeida\*,  
Wagner Coelho A. Pereira

Program of Biomedical Engineering, Luiz Alberto Coimbra Institute - Coppe, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 8 November 2006

Received in revised form

16 May 2007

Accepted 16 May 2007

### Keywords:

Discrete-event computer simulation

Mammography

Equipment maintenance

## ABSTRACT

**Objective:** This work develops a discrete-event computer simulation model for the analysis of a mammography clinic performance.

**Material and methods:** Two mammography clinic computer simulation models were developed, based on an existing public sector clinic of the Brazilian Cancer Institute, located in Rio de Janeiro city, Brazil. Two clinics in a total of seven configurations (number of equipment units and working personnel) were studied. Models tried to simulate changes in patient arrival rates, number of equipment units, available personnel (technicians and physicians), equipment maintenance scheduling schemes and exam repeat rates. Model parameters were obtained by direct measurements and literature reviews. A commercially-available simulation software was used for model building.

**Results:** The best patient scheduling (patient arrival rate) for the studied configurations had an average of 29 min for Clinic 1 (consisting of one mammography equipment, one to three technicians and one physician) and 21 min for Clinic 2 (two mammography equipment units, one to four technicians and one physician). The exam repeat rates and equipment maintenance scheduling simulations indicated that a large impact over patient waiting time would appear in the smaller capacity configurations.

**Conclusions:** Discrete-event simulation was a useful tool for defining optimal operating conditions for the studied clinics, indicating the most adequate capacity configurations and equipment maintenance schedules.

© 2007 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

The efficient and safe use of medical technology is a strong urge in today's demanding health services environment [1]. This is particularly true in radiology services (diagnosis and treatment), where effective use is extremely important for the well being of both patients and operators, and where efficiency gains directly reflect on costs, for example, through the reduction of exams repeating rates [2,3].

Mammography is one of the most important among these, due to its use for routine breast cancer prevention screening. Mammography uses low-energy X-rays and allows the visualization of fine details in the breast tissue, particularly microcalcifications or soft tissue masses (cystic or nodular), allowing, for instance, for the early diagnosis of cancer [4,5].

A typical mammography clinic consists of: mammography equipment, a darkroom, radiology technicians, physicians and attendants. The number of these varies according to clinic

\* Corresponding author. Programa de Engenharia Biomédica, Coppe - Federal University Rio de Janeiro, Caixa P.O. 68510, Cidade Universitária, Rio de Janeiro RJ, Brazil. Tel.: +55 21 2562 8630; fax: +55 21 2562 8591.

E-mail address: [renan@peb.ufjf.br](mailto:renan@peb.ufjf.br) (R.M.V.R. Almeida).

0169-2607/\$ - see front matter © 2007 Elsevier Ireland Ltd. All rights reserved.

doi:10.1016/j.cmpb.2007.05.006

size, demand and purposes. Therefore, it is important to define a strategy to optimize the quantities of these elements without loss of efficiency, considering an expected patient flow rate.

This study considered a mammography equipment as being composed of mechanical and electro-electronic parts and an X-ray tube [6]. Each of these components has a known life cycle, making the estimation of the equipment global failure rate possible. However, along the life cycle of the equipment, interaction among parts can make the assessment of failure rates unreliable, thus demanding the adoption of preventive maintenance strategies. Although apparently simple, finding the best preventive strategies for medical equipment operating under specific situations (e.g., the type of equipment use routine) is actually a complex problem, which frequently demands mathematical analysis and modeling. Discrete-event computer simulation (Section 2.1), although already known as an important design tool, is still mainly used inside the industrial and aeronautical engineering contexts [7,8]. However, this kind of simulation has already been shown to be a fast and low-cost approach for health resources modeling [9–13]. This simulation strategy is thus called due to the (discrete) nature of its variables, examples being the number of flights arriving at a specific airport [8], the number of patients arriving in an emergency service [12] or the number of personnel required to staff a clinical laboratory [13].

The objective of this work was the development of a model for the global assessment of patient flow, equipment utilization and personnel needs under the standard working routine of a mammography facility (the unit 3 of the National Cancer Institute of Brazil-INCa Rio de Janeiro, RJ, Brazil). The impact of the time spent with equipment maintenance procedures is also included in the analysis.

---

## 2. Methodology

### 2.1. Computer simulation

Simulation refers to a model built in order to determine the response of a system to changes in its internal structure and inputs [14]. Usually, it consists of a simplified representation of a dynamic process deemed too complex for direct analysis [15]. Thus, the simulation model is smaller, cheaper and simpler, and its purpose is analyze and understand the behavior of a system as a function of actions and alternative scenarios [16].

Simulation methodologies are not specific for a certain application, but, rather, have general characteristics that allow their use, after adaptation, to almost any problem. However, they are especially useful in situations in which the intrinsic stochastic characteristics of a problem, along with the interaction of its elements, make the use of classical statistical techniques unsuitable [14].

---

## 3. The standard mammography clinic

The clinic model used in this work is based on a clinic of The National Cancer Institute of Brazil (INCa), which is the agency of the Ministry of Health entrusted with cancer control programs in the country. The main responsibilities of the Insti-

tute concern the management of a net of hospitals that offers general oncology services and radiology training courses for technicians and doctors. Five units of the Institute are located in the city of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro State (Brazil). The unit 3 is specialized in breast cancer treatment and diagnosis. This unit has a high patient flow, offering both inpatient and outpatient services. Its mammography clinic consists of a changing room, a mammography viewing room, a staff lounge, a darkroom and two examination rooms with one mammography machine each. The staff consists of three technicians and two medical radiologists.

In the hospital, mammography equipment is under both preventive and corrective maintenance. Preventive maintenance takes place during scheduled full-day stops. The hospital has no in house maintenance system and, at the time of the study, patient consultations were not scheduled.

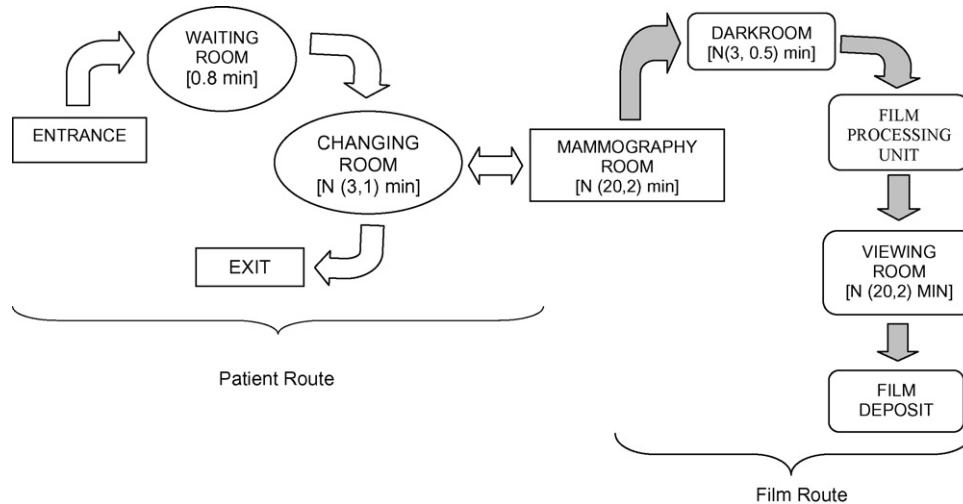
---

## 4. The proposed discrete-event model

To represent the clinic working routine, a discrete-event simulation model was developed with the MedModel software 6.0 (Promodel Co.). This model is based on the concepts of resources, entities, locations, processes and attributes. In this representation, resources perform activities with entities (in this case, e.g., the mammography technicians and doctors process patients and X-ray films). Locations are the clinic rooms where the resources operate and processes are the routines that connect locations. Attributes are the possible states of the resources and entities, for example, “operational” and “not operational. These elements, taken together with the physical layout of a system, allow for the construction of computer models that represent the system actual operating conditions. The basic system flow chart can be seen in Fig. 1.

The system flow of the facility consists in the flow of two entities: the patients and the mammography films. The input parameter values for the present model were obtained by field measurements, interviews and by a literature search. Detailed interviews were performed with a total of seven staff members (clinic technicians, physicians and managers), during the period of one working week. The literature search concerned similar studies for the last 10 years, and helped to identify the values that should be used for the parameters speed (38 m/s, obtained from (x)) and patient arrival distribution (defined as exponential, following e.g., [6,17]). Predefined structured forms were used for the collection of information such as patient type of exam and type of equipment maintenance, and open-ended questions were used for obtaining a better understanding of the patient flow process. The parameters waiting room capacity, changing room capacity, darkroom capacity and mammography viewing room capacity were assigned the value 30 (double the patient/day average), thus assuring that these locations would have enough space to accommodate the represented entities (patients and X-ray films). The mammography room capacity was assigned value one, since only one patient is attended each time. Then it is followed by average of patients/day. Changing room time and mammography room time are represented as Normal distributions in which the averages are the periods of time that the entities spend





**Fig. 1 – Flow chart of the analysed system. The times spent by entities in each location are shown inside brackets. Legend: system flow: a patient arrives to the clinic and waits to be called by a technician at an entrance room. The patient is then led to a changing room, and, afterwards, taken to the mammography room, where the mammography examination is performed. At this point, another entity is introduced, the “X-ray film.” A technician takes the film to the darkroom, and, afterwards, places it in a box in the mammography viewing room. At the same time, the patient goes back to the changing room and waits for the mammogram inspection by a doctor. In case an exam repetition is deemed necessary, the patient is again taken to the mammography room. If the mammogram is considered satisfactory, the patient is discharged. The mammogram is then stored in a film deposit.**

inside the locations. Waiting room time is a fixed, directly measured value. Length of stay is the average time, in minutes, from arrival until discharge. Repeat rates of 0, 5 and 10% were simulated, ranging from a hypothetical ideal situation to a critical operation condition. Model parameters and variable explanations can be seen in Table 1.

Table 1 – Model input parameters, mammography clinic, discrete-event simulation	
Parameters	Values
Mammography room capacity	1
Average of patients/day (expected number of patients/day)	15
Working time (time during which the clinic locations are available to receive entities)	08:00–18:00 h
Pauses (periods during which resources and locations are unavailable (e.g., lunch breaks))	12:00–13:00 h
Time spent in waiting room (min)	0.8
Time spent in changing room (min)	N (3,1)
Time spent in mammography room (min)	N (20,2)
Patient arrival distribution (average between 15 and 35 min)	Exponential
Patient walking speed (speed with which resources and entities move inside the system)	38 m/min
Exam repeat rates (percent of exams repeated for any reason)	0–10, 5% increments
Simulation period (period of time during which processes are performed)	Five days (max)

Starting from the actual hospital operating conditions, described above, two mammography clinic models were built, the first with one conventional mammography machine, one physician and the number of technicians varying from one to three (Clinic 1 – configurations a, b and c, Table 2); and the second with two conventional machines, one physician and one to four technicians (Clinic 2 – configurations d, e, f and g, Table 2). At first, simulations were performed in order to determine the best patient arrival rate, that is, the rate that would allow for a minimum length of stay of a patient in each clinic. Arrival rates were defined as following an exponential distribution (6, 17) with averages varying between 15 and 35 min (2 min increments, resulting in 11 tested distributions).

Table 2 – Simulation models developed – clinic configurations (See Table 3)	
Clinics	Configurations
Clinic 1: (one mammography equipment, waiting room, changing room, mammography room, darkroom, mammography viewing room)	a: one technician and one physician
	b: two technician and one physician
	c: three technician and one physician
Clinic 2: (two mammography equipments, waiting room, changing room, two mammography rooms, darkroom, mammography viewing room)	d: one technician and one physician
	e: two technician and one physician
	f: three technician and one physician
	g: four technician and one physician

After arrival rates were thus optimized, a model was developed in order to determine the maximum number of patients that could still be attended, given a clinic capacity. With this end, the number of patients/day was increased for all the configurations described before, until the point in which the system was saturated (i.e., non-attended or “excluded” patients appeared).

In the next step, exam repeat rates were used to estimate the impact of the equipment operation conditions on the system, also with the “optimum” arrival rates obtained as before and using as output the patient’s length of stay. Finally, the impact of different maintenance strategies for the overall system performance were analyzed, supposing, for Clinic 2, that equipment maintenance either stops or happened simultaneously (both equipment were stopped at the same time for a full day) or on alternate days. In a given simulation week (the week in which maintenance procedures take place) equipment maintenance was scheduled assuming a full day of stop ( $N(1440, 5)$  distribution in minutes), in any of the working days of the week. In this week, it was also assumed that patients were re-distributed along the remaining weekdays, in order to keep a total of 75 patients/week (the desired work load for a normal week).

### 5. Results

Fig. 2a shows the arrival rates for all configurations for Clinics 1 and 2. In Clinic 1, with one mammography equipment, the shortest average length of stay is found with an arrival rate of approximately 29 min, keeping fixed the number of 15 patients/day. For Clinic 2, with two equipment units, this rate is 25 min for configuration e and 21 min for configuration f. Fig. 2b shows the variation patient’s length of stay as a function of number of patients/day for the fixed optimal patients arrival rate obtained in Fig. 2a. It can be seen that Clinic 1 presents a considerable increase in the patient’s length of stay when patient arrivals rise above 15 patients/day. Beyond this point, non-attended, excluded patients are detected in the model. The same is seen for clinic with two equipments, configurations e and f, with a patient arrival upper limit of 21 and 25 patients/day, respectively.

Table 3 shows the impact of the exam repeat rates over the patient’s length of stay for Clinics 1 and 2, the rate of excluded patients and the rates of personnel (doctors and technicians) occupation. The largest length of stay is obtained in the Clinic 1 configuration a, which also has the largest rate of person-

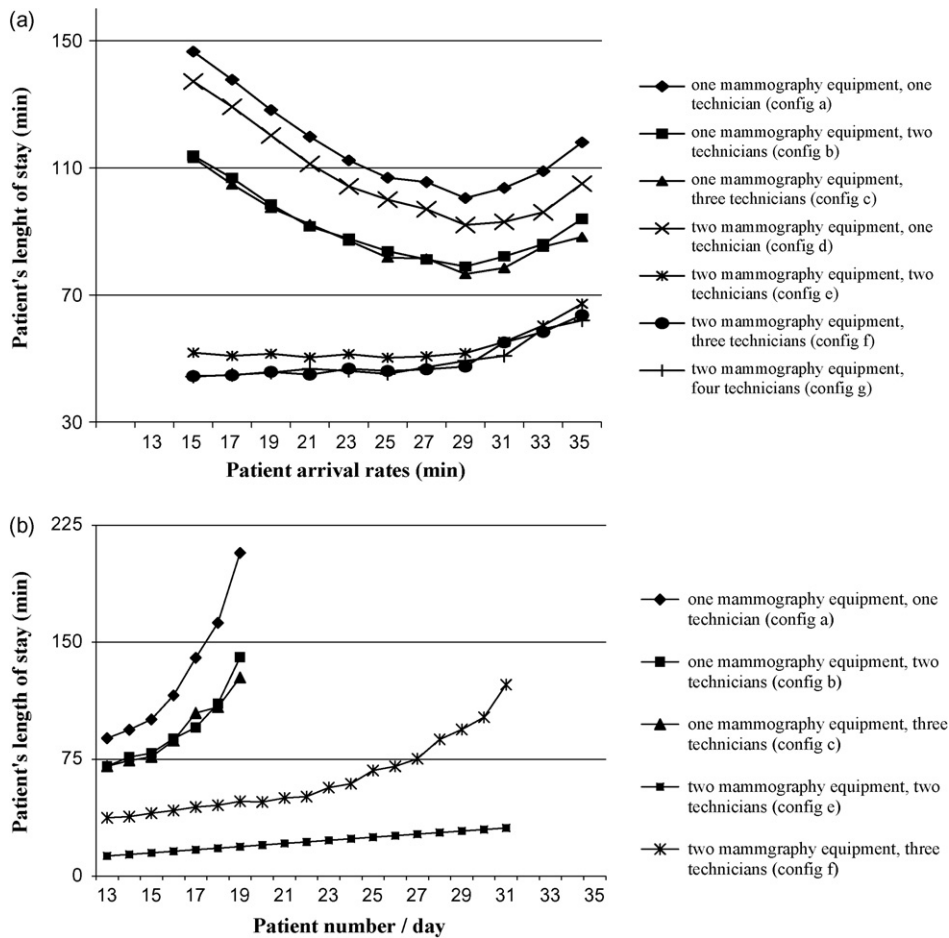


Fig. 2 – (a) Patient’s length of stay and arrival rates, Clinics 1 and 2 for fixed number of 15 patients/day, (b) Clinics 1 and 2 capacity simulation as a function of patient number and length of stay, for fixed patient arrival rate of 29 min (Clinic 1) and 21 min (Clinic 2).

**Table 3 – Exam repeat rate impact on patient's length of stay and personnel occupation rates, mammography clinic discrete-event simulation**

Clinic 1									
Exam repeat rates (%)	Configuration a			Configuration b			Configuration c		
	Length of stay	Technician utilization	Physician utilization	Length of stay	Technician utilization	Physician utilization	Length of stay	Technician utilization	Physician utilization
0	100	69	57	78	34	57	76	22	57
5	114	73	59	87	35	60	88	24	60
10	137	75	61	97	37	63	97	25	63
Clinic 2									
	Configuration e			Configuration f					
	Length of stay	Technician utilization	physician utilization	Length of stay	technician utilization	physician utilization			
0	43	34	57	40	19	57			
5	47	36	60	42	24	60			
10	49	38	63	45	25	63			

Length of stay and blocked time: minutes, technician utilization and physician utilization: % of time, configurations a, b, c, e, and f (see Table 2 for explanations).

nel occupation. Configurations d and g had performance very close to those shown and were not presented. Table 4 shows the impact of the maintenance stops over the patient's length of stay and over the number of excluded patients, according to repeat rates ranging from 0 to 10%. All configurations of Clinic 1 presented patient excluded rates different from zero.

## 6. Discussion

Computer simulation for health systems planning already presents a history of application successes [18–21]. For instance, in The Netherlands, a computer simulation was very useful for the optimization of hospital catheterization room usage. In that study, a simulation was built for a hospital in which half of the cardiac catheterizations were performed as emergency procedures. As a result, it was possible to identify and implement a more optimized system configuration, in which a specialist was exclusively in charge of emergency procedures, and the catheterizations were not anymore fitted into the normal schedule of the attending physicians [22]. In other applications, computer simulations were useful for the optimization of the staff size in a teaching hospital ambulatory in the USA [23]; and pharmacy services were successfully re-organized in a London hospital [24]. In addition, a large number of studies have been concerned with the assessment of the impact of increased patient arrivals on hospital emergency services [12,13,25–27]. One of the few limitations of this type of modeling is that its results are not automatically generalizable to other clinic setups, due to the obvious constraints introduced by the parameters used in each specific simulation. In this case, it is necessary to develop analogous models, taking these new constraints into account.

The main concern of the present work was with the development of a model for determining the operation limits of a standard mammography clinic, in order to assess its equip-

ment utilization and personnel needs. With this aim, a global assessment of the mammography facility was performed, in terms of patient flow and maintenance time. The model used the patients as the main model entities, around which processes were organized, and the main variable of interest was the average patient's length of stay inside the system. The clinic staff was fully cooperative with the present work.

According to the developed simulations (Fig. 2a), the smallest patient length of stay was obtained when the patient's arrival rate followed an exponential distribution with an average of 29 (Clinic 1) and 21 min (Clinic 2), characterizing the appropriate patient scheduling design for each configuration. Fig. 2a also shows that configurations b and c (for Clinic 1) and f and g (for Clinic 2) had a similar performance in terms of patient's length of stay, revealing that not much would be gained by adding further technicians to the system. Thus, as the patient arrival rates increase, patients length of stay decrease (or keep constant), showing a more efficient resource utilization. Then, after an "optimum point" (Fig. 2), patients again compete for resources, arriving faster than the duration of their attendance cycle (the time demanded for completing the "patient route" on Fig. 1).

On the other hand, in Fig. 2a it can also be seen that the configuration d (two equipments and one technician) performs similarly to configuration a Clinic 1, showing that a second mammography equipment would be of very little use in that case. This figure also shows that, for configuration d, the use of one single technician makes the system unstable after the optimum patient arrival rate is exceeded, causing a "jump" in the length of stay results. In Fig. 2b, it can be seen that the largest patient demand that could be managed by the system (resulting in a 50% increase) would be obtained by increasing the number of mammography unities from one to two.

Concerning the impact of repeat exams over patient flow (Table 3), repeat rates up to 10% were critical only for those configurations that assumed one mammography equipment

**Table 4 – Impact of scheduled maintenance stops and repeat rates, mammography clinic discrete-event simulation length of stay: minutes, number of non-attended (excluded) patients**

	Configuration a Repeat rates (%)			Configuration b Repeat rates (%)			Configuration c Repeat rates (%)		
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
<b>Clinic 1:</b>									
Length of stay	100	114	137	78	87	97	76	88	97
Patients excluded	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Length of stay	298	356	363	133	137	181	133	136	181
Patients excluded	1	6	6	0	0	1	0	0	1
Length of stay									
Patients excluded									
Length of stay									
Patients excluded									
<b>Clinic 2:</b>									
Length of stay	43	47	49	49	49	40	42	42	45
Patients excluded	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Length of stay	59	64	67	67	67	60	64	64	71
Patients excluded	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Length of stay	65	78	88	88	88	51	72	72	84
Patients excluded	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Configuration e</b> Repeat rates (%)	0			5			10		
<b>Configuration f</b> Repeat rates (%)	0			5			10		

No stop: simulation for normal operating days. One day Stop, stops in alternate days, stops in same day, simulation for maintenance days.

per clinic, in which case the patient's length of stay and the personnel utilization rates were strongly increased. When two mammography equipment units were simulated (the actual number in use at the studied clinic), increases in repeat exams and stops in maintenance could be better absorbed, without important impacts over the length of stay or personnel utilization rates, showing an idle capacity in the system. Regarding personnel numbers, the patient's length of stay showed little variation when the number of doctors was changed.

Table 4 presented the results of different maintenance schedules and exam repeat rates as a function of length of stay and personnel utilization rates. For Clinic 1, stops were supposed to take place during a full day, and, for Clinic 2, it is supposed taking place, either in a same day or in alternate days. For both clinics, an increase in the number of technicians, as well as a decrease in the exam repeat rate, result in an increase in the system capacity, as expected.

In what regards technician utilization in the Clinic 1 configuration, it could be seen that, in the most unfavorable configuration, the percent of technician used time (technician utilization – Table 3) varied between 69 and 75%. This percent is drastically reduced for configuration b, and, especially, for configuration c, in which utilization percents drop to 22–25%. Therefore, the presence of three technicians in such a clinic is not advisable. Concerning the physician utilization rates, this percent is kept between 57 and 63%, demonstrating that configuration b is the most adequate. A similar reasoning applies to Clinic 2, in which configuration e can be shown to be the most appropriate.

The assumption of a preventive maintenance schedule and the redistribution of patients to cope with the arrival of 75 patients/week resulted in a length of stay increase, as well as an increase in personnel utilization rates. The critical situations appeared in the configurations with a smaller attendance capacity, such as configuration a, in which case, patients excluded would have to be re-scheduled. In configurations e and f for Clinic 2, no patients were excluded, since the attendance capacity was large enough to absorb the patient increase, irrespectively of the adopted maintenance scheduling.

The ratio 15 patients/day is an actual value obtained from the INCa clinic. This is the defined number of patients accepted daily by the clinic, a small number when compared to the clinics capacity. Therefore, this was the value used in the stochastic curve representing patient's arrival distribution. This number was then varied within the range 13–31 (Fig. 2b), in order to find the maximum number of patients that could be attended, given a specific clinic configuration.

In terms of model empirical validation, the configuration that most closely represented the actual studied clinic (configuration f on Tables 2–4) presented results in close agreement with those obtained from the INCa historical data.

Study feedback was provided to the clinic staff and managers, but fully implementing the results of the present work is contingent on infrastructure/human resources changes (e.g., increase in the number of technicians) that are not completely viable in the short time, and equipment maintenance is not always performed in-house. However, some of the proposals of the study could be immediately adopted by the clinic. For instance, optimum patient arrival rates were estimated as 29

(Clinic 1) and 21 min (Clinic 2), and a telephone scheduling system is being implemented for patient appointment that takes these results into account.

The general conclusion to be drawn from these simulation models is that, the actual capacity of the clinic is over-dimensioned for its present demand. Even if this demand were to be increased by about two-thirds, the existing capacity would still be able to function without personnel or equipment utilization overload.

## Acknowledgement

This work was partially supported by a grant from the Brazilian Research Council (CNPq) and from the Rio de Janeiro State Science Foundation (Faperj), to which the authors are thankful.

## REFERENCES

- [1] N.D. Glick, C.C. Blackmore, W.N. Zelman, Extending simulation modeling to activity-based costing for clinical procedures, *J. Med. Syst.* 24 (2) (2000) 77–89.
- [2] A.R. Mergulis, J.H. Sunshine, Radiology at the turn of the millennium, *Radiology* 214 (2000) 15–23.
- [3] D.M. Dickey, Clinical engineering helps reduce equipment costs, *Healthc. Financ. Manage.* 49 (1995) 50–53.
- [4] E. Martin, *Concise Colour Medical Dictionary*, Oxford University Press, Oxford, 1998.
- [5] T. Arod'z, M. Kurdziel, T.J. Popiela, E.O.D. Sevre, D.A. Yuen, Detection of clustered microcalcifications in small field digital mammography, *Comput. Meth. Prog. Bio.* 81 (2006) 56–65.
- [6] J.D. Bronzino, *The Biomedical Engineering Handbook*, second ed., CRC and IEEE Press, 2000.
- [7] E.J. Chen, Y.M. Lee, P.L. Sellikson, A simulation study of logistics activities in a chemical plant, *Simulat. Model. Pract. Theor.* 10 (2002) 235–245.
- [8] M.A. Stamatopoulos, K.G. Konstantinos, A.R. Odoni, A decision support system for airport strategic planning, *Transport. Res. Part 12 C* (2004) 91–117.
- [9] L.G. Connelly, A.E. Bair, Discrete event simulation of emergency department activity: a platform for system-level operations research, *Acad. Emerg. Med.* 11 (11) (2004) 1177–1185.
- [10] P. Eveborn, P. Flisberg, M. Rönqvist, Laps care – an operational system for staff planning of home care, *Eur. J. Oper. Res.* 171 (2006) 962–976.
- [11] O. Miro, M. Sanchez, G. Espinosa, B. Coll-Vinent, E. Bragulat, J. Millá, Analysis of patient flow in the emergency department and the effect of an extensive reorganization, *Emerg. Med. J.* 20 (2003) 143–148.
- [12] S. Liu, C. Hobgood, J.H. Brice, Impact of critical bed status on emergency department flow and overcrowding, *Acad. Emerg. Med.* 10 (2003) 382–385.
- [13] G.G. van Merode, A. Hasman, J. Derks, B. Schoenmaker, H.M.J. Goldschmidt, Advanced management facilities for clinical laboratories, *Comput. Meth. Prog. Bio.* (50) (1996) 195–205.
- [14] C.R. Harrell, R.E. Bateman, T.J. Gogg, *System improvement using simulation*, Orem, Utah: PROMODEL Corporation, 1996.
- [15] A.M. Law, W.D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, third ed., McGraw-Hill, Boston, 2000.
- [16] C.G. Cassandras, S. Lafortune, *Introduction to Discrete Event Systems*, Klumer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [17] N. Hupert, A.I. Mushlin, M.A. Callahan, Modeling the public health response to bioterrorism: using discrete event simulation to design antibiotic distribution centers, *Med. Decis. Making* 22 (17) (2002) S17–S25.
- [18] F. Zilm, K. Culp, B. Dorney, Virtual ambulatory care: computer simulation applications, *J. Ambul. Care Manage.* 26 (2003) 7–21.
- [19] A.X. Costa, S.A. Ridley, A.K. Shahani, P.R. Harper, V. De Senna, M.S. Nielsen, Mathematical modeling and simulation for planning critical care capacity, *Anaesthesia* 58 (2003) 320–327.
- [20] C.E. Lucas, K.J. Buechter, R.L. Coscia, J.M. Hurst, J.W. Meredith, J.D. Middleton, C.R. Rinker, D. Tuggle, A.L. Vlahos, J. Wilberger, Mathematical modeling to define optimum operating room staffing needs for trauma centers, *J. Am. Coll. Surg.* 192 (2001) 559–565.
- [21] J.G. Anderson, R. Ramanujam, D. Hensel, M.M. Anderson, C.A. Sirio, The need for organizational change in patient safety initiatives, *Int. J. Med. Inform.* 75 (2006) 809–817.
- [22] S. Groothuis, G.G. Merode, A. Hasman, Simulation as decision tool for capacity planning, *Comput. Meth. Prog. Bio.* 66 (2001) 139–151.
- [23] J.E. Stahl, M.S. Roberts, S. Gazelli, Optimizing management and financial performance of the teaching ambulatory care clinic, *J. Gen. Intern. Med.* 18 (4) (2003) 266.
- [24] B. Dean, A. Van Ackere, S. Gallivan, N. Barber, When should pharmacists visit their wards? An Application of simulation to planning hospital pharmacy services, *Health Care Manag. Sci.* 2 (1) (1999) 35–42.
- [25] A. Hirshberg, M. Stein, R. Walden, Surgical resource utilization in urban terrorist bombing a computer simulation, *J. Trauma* 47 (3) (1999) 545–550.
- [26] M.J. Shull, K. Lazier, M. Vermeulen, S. Mawhinney, L. Morrison, Emergency department contributors to ambulance diversion: a quantitative analysis, *Ann. Emerg. Med.* 41 (2003) 476–479.
- [27] S.J. Weiss, R. Derlet, J. Arndahl, A.A. Ernst, J. Richards, M.F. Frankelton, R. Schwab, T.O. Stair, P. Vicellio, D. Levy, M. Brautigan, A. Johnson, T.G. Nick, Estimating the degree of emergency department overcrowding in academic medical centers: results of the National ED overcrowding Study, *Acad. Emerg. Med.* 11 (2004) 38–50.

## Apêndice 2

- Simulação Computacional de Estratégias de Manutenção de Equipamentos de Mamografia, publicado nos Anais do III Congresso Latino Americano de Engenharia Biomédica (COELLI *et al*, 2004).
- “Análise de Desempenho do Fluxo de Atendimento Hospitalar com Auxílio da Simulação Computacional”, publicado nos Anais do III Congresso Latino Americano de Engenharia Biomédica (FERREIRA *et al*, 2004).
- “Simulación Computacional para la Optimización de una Clínica de Fisioterapia” publicado no XXIX *Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica*, CNIB 2006 (VILLAMIZAR *et al*, 2006).
- Otimização do Atendimento de um Grande Centro Cirúrgico por Meio de Simulação Computacional, publicado no XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (FERREIRA *et al*, 2006).
- “Modelagem Computacional de uma Clínica de Fisioterapia” publicado no XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (VILLAMIZAR *et al*, 2006).
- Optimizing patient flow in a large hospital Surgical Center by means of discrete-event computer simulation models” - *Journal of Evaluation in Clinical Practice* (FERREIRA *et al*, 2007).

O primeiro artigo (COELLI *et al*, 2004) teve como objetivo apresentar um modelo de uma clínica padrão para analisar o impacto de diferentes estratégias de manutenção na rotina de atendimento de pacientes e foi o primeiro trabalho publicado fruto da presente pesquisa em simulação computacional. O modelo foi implementado no *software MedModel*

e foram analisadas as situações de paradas programadas e não (manutenções programadas e não). Os resultados indicaram um menor impacto no atendimento de pacientes em casos de agendamento da manutenção.

O segundo (FERREIRA et al, 2004) apresenta uma modelagem de um ambiente de atendimento de clínica ambulatorial, também usando o *software MedModel* como ferramenta de simulação computacional. O objetivo foi estudar diferentes estratégias de atendimento, considerando estatísticas de produtividade tais como número de pacientes atendidos por dia; entradas falhas de paciente (falta de espaço no momento da sua chegada); quantidade máxima de pacientes na sala de espera; tempo (%) que esta permanece lotada; utilização percentual do tempo de trabalho dos profissionais; média dos tempos de espera dos pacientes por atendimento; média do tempo total dos pacientes no sistema. Quatro configurações de clínica foram simuladas no sentido de identificar a melhor configuração em termos de produtividade.

O terceiro (VILLAMIZAR et al, 2006) apresenta a construção e análise de um modelo computacional de uma clínica de fisioterapia na cidade do Rio de Janeiro. Foram avaliadas quatro estratégias de atendimento, variando-se o número e a programação de chegadas de pacientes e recursos da clínica, com o objetivo de otimizar a capacidade e atendimento da clínica. No quarto trabalho (FERREIRA et al, 2006), o objetivo foi definir uma estratégia para melhorias no desempenho e na produtividade do Centro-Cirúrgico (CC) de um grande hospital municipal na cidade do Rio de Janeiro.

O quinto (VILLAMIZAR et al, 2006), teve como objetivo a construção e análise de um modelo computacional para uma clínica padrão de Fisioterapia de uma universidade privada. Obtiveram-se dados de atendimento e chegadas de pacientes no período de novembro de 2005 a fevereiro de 2006, e quatro estratégias de simulação foram testadas,

variando o número de pacientes, os recursos e o agendamento dos pacientes. Finalmente, no sexto (FERREIRA et al, 2007), a metodologia de simulação foi utilizada para analisar o impacto do aumento do número de leitos pós-anestésico e mudanças nas estratégias das salas de cirurgia.



## **Apêndice 3**

### **Códigos fonte dos modelos**

```

*****
*****
*
*
*
*              Formatted Listing of Model:
*
*              D:\Fernando\Doutorado\Pesquisa Simulação\inca3.13.MOD
*
*
*
*****
*****

```

```

#
#Modelo de simulação da Clinica de Mamografia do Instituto Nacional do
#Câncer
operando com um só equipamento de mamografia!
Time Units:              Minutes
Distance Units:          Meters

```

```

*****
*****
*
*              Locations
*
*
*****
*****

```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
-----	---	---	----	-----	-----
Entrada	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Saída	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca	inf	10	Time Series	Oldest, ,	First
sala_troca.1	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.2	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.3	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.4	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.5	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.6	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.7	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.8	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.9	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.10	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_mamografia_1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Camara_escura	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Processadora	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo	1	5	Time Series	Oldest, ,	First
Laudo.1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.2	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.3	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.4	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.5	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera	1	4	Time Series	Oldest, ,	First
Espera.1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera.2	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera.3	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera.4	1	1	Time Series	Oldest, ,	

deposito\_de\_filmes inf 1 Time Series Oldest, ,

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*  
\* Clock downtimes for Locations  
\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

Loc	Frequency	First Time	Priority	Scheduled	
Disable Logic					
-----	-----	-----	-----	-----	-----
sala_mamografia_1	120 hr	0 hr	99	Yes	Yes

display "manutenção"

Wait N(1440, 5) min

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*  
\* Entities  
\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
Paciente	114	Time Series	
Filme	114	Time Series	

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*  
\* Path Networks  
\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

Name	Type	T/S	From	To	BI	Dist/Time
rede_1	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	10.26
1				N2	N3	Bi 25.31
1				N3	N4	Bi 8.60
1				N4	N5	Bi 26.14
1				N5	N6	Bi 31.77
1				N4	N7	Bi 8.30
1						

1	N7	N8	Bi	9.72
1	N8	N9	Bi	14.25
1	N8	N10	Bi	18.70
1	N4	N11	Bi	11.60
1	N11	N12	Bi	7.93
1	N12	N13	Bi	10.59
1	N13	N14	Bi	14.86
1	N14	N15	Bi	11.39
1	N14	N5	Bi	21.77
1	N3	N16	Bi	60.02
1	N14	N17	Bi	32.72

```

*****
*****
*
*                               Interfaces
*
*****
*****

```

Net	Node	Location
-----	-----	-----
rede_1	N16	Saída
	N9	sala_mamografia_1
	N12	Camara_escura
	N13	Processadora
	N15	Laudo
	N2	Espera
	N17	deposito_de_filmes
	N6	sala_troca
	N1	Entrada

```

*****
*****
*
*                               Mapping
*
*****
*****

```

Net	From	To	Dest
-----	-----	-----	-----
rede_1	N3	N2	
	N4	N3	
	N5	N4	
	N7	N4	

N8	N7
N11	N4
N12	N11
N13	N12
N14	N13
N3	N4
N4	N5
N13	N14
N14	N5
N5	N6
N4	N7
N7	N8
N8	N9
N4	N11
N11	N12
N5	N14
N12	N13
N14	N15
N3	N16
N14	N17

```

*****
*****
*
*                               Resources
*
*****
*****

```

Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search	Path	Motion
Medico_radiologista	1	By Unit	Closest	Oldest	rede_1	Empty:
114 mpm						Home: N17 Full: 114
mpm						(Return)
Tecnico_mamografia	1	By Unit	Closest	Closest	rede_1	Empty:
114 mpm						Home: N5 Full: 114
mpm						(Return)

```

*****
*****
*
*                               Park Searches
*
*****
*****

```

Res	Node	Parking Node List
Medico_radiologista	N17	N17

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Processing

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Process

Routing

Entity	Location	Operation	Blk	Output
Destination	Rule	Move Logic		
-----				
Paciente	Entrada	INC Vnumero_pacientes graphic 1	1	Paciente Espera
FIRST 1	MOVE ON rede_1			
Paciente Espera		graphic 1 GET tecnico_mamografia		
sala_troca	FIRST 1	MOVE WITH tecnico_mamografia	1	Paciente
free tecnico_mamografia				
Paciente sala_troca		graphic 2 If changed=0 then begin WAIT N(3, 1) INC deposito route 1 end else If changed=1 then begin #MATCH Film_ID #JOIN 1 filme INC vexames_repetidos route 1 end else begin graphic 1 #MATCH Film_ID #JOIN 1 filme #graphic 1 route 2 end		

```

1      Paciente
sala_mamografia_1  FIRST 1  graphic 2
IF RESQTY (tecnico_mamografia)=0 then GET tecnico_mamografia
MOVE ON Rede_1

2      Paciente Saída
FIRST 1  MOVE ON Rede_1
Paciente sala_mamografia_1  graphic 4
INC (Film_number)
Film_ID = Film_number
^ N(20, 5)
afilme_qualidade=dqualidade_filme()
Ifofilme_qualidade=1 then
begin
INC changed, 2
end
else
Ifofilme_qualidade=2 then
INC changed, 1

1      Paciente
sala_troca          FIRST 1  graphic 3
MOVE ON Rede_1
free tecnico_mamografia

2*     Filme
Camara_escura      FIRST 1  graphic 1
MOVE WITH Tecnico_mamografia FOR 1 THEN FREE

Paciente Saída      graphic 1          1      Paciente EXIT
FIRST 1  MOVE ON Rede_1

Filme      Camara_escura      graphic 2
free all
WAIT N(3, 0.5)      1      Filme
Processadora      FIRST 1  move on rede_1
Filme      Processadora      graphic 3
#MATCH Film_ID
inc vnúmero_de_filmes
1      Filme      Laudo
FIRST 1  graphic 3
GET tecnico_mamografia
MOVE WITH tecnico_mamografia FOR 1 THEN FREE

```

```

Filme      Laudo                graphic 4
                USE Medico_radiologista FOR N(20,2) min

                                1      Filme
deposito_de_filmes FIRST 1  MOVE WITH Medico_radiologista FOR 0.8 THEN
FREE

Filme      deposito_de_filmes wait N(900000, 99) min
                                1      Filme      EXIT
FIRST 1  move on rede_1

```

```

*****
*****
*
*                               Arrivals
*
*****
*****

```

Entity	Location	Qty	Each	First Time	Occurrences	Frequency
Paciente	Entrada	1		Wk 1, Mon @ 08:05 AM 15		E (29)

```

*****
*****
*
*                               Shift Assignments
*
*****
*****

```

```

Locations...      Resources...      Shift Files...
Priorities... Disable Logic...
-----
sala_mamografia_1 Medico_radiologista C:\Fernando\Doutorado\Pesquisa
99,99,99,99      No
                Tecnico_mamografia

```

```

*****
*****
*
*                               Attributes
*
*****
*****

```

ID	Type	Classification
changed	Integer	Entity
#		
#Identidade do filme		
Film_ID	Integer	Entity



afilme\_qualidade Integer Entity

```
*****
*****
*                               Variables (global)
*
*****
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
#			
#Número de filmes utilizados			
Vnumero_de_filmes	Integer	0	Time Series
#			
#Número de exames refeitos			
Vexames_repetidos	Integer	0	Time Series
#			
#Número de pacientes (contagem)			
Vnumero_pacientes	Integer	0	Time Series
#			
#Conta o numero de filmes utilizados			
film_number	Integer	0	Time Series
#			
#numero de filmes no deposito			
deposito	Integer	0	Time Series

```
*****
*****
*                               Arrival Cycles
*
*****
*****
```

ID	Qty / %	Cumulative	Time (Hours)	Value
-----				
ciclo1	Percent	No	8:00-12:00	50
			13:00-18:00	50

```
*****
*****
*                               User Distributions
*
*****
*****
```

ID	Type	Cumulative	Percentage	Value
-----				
dqualidade_filme	Discrete	No	100	1
			0	2

```
*****
*****
```

```
*
*
* External Files
*
*****
*****
```

ID	Type	File Name
Prompt		
(null)	Shift	C:\Fernando\Doutorado\Pesquisa
Simulação\shift_coelli.sft		

```

*****
*****
*
*
*
*          Formatted Listing of Model:
*
*      D:\Fernando\Doutorado\ArtigoInternacional_3\inca3.12_ultimo.MOD
*
*
*
*****
*****

```

```

#
#Modelo de simulação da Clinica de Mamografia do Instituto Nacional do
Câncer
operando com dois equipamentos de mamografia!
Time Units:          Minutes
Distance Units:     Meters

```

```

*****
*****
*
*          Locations
*
*
*****
*****

```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
Entrada	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Saída	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca	inf	10	Time Series	Oldest, , First	
sala_troca.1	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.2	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.3	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.4	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.5	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.6	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.7	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.8	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.9	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_troca.10	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_mamografia	1	2	Time Series	Oldest, , First	
sala_mamografia.1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
sala_mamografia.2	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Camara_escura	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Processadora	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo	1	5	Time Series	Oldest, , First	
Laudo.1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.2	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.3	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.4	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Laudo.5	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera	1	4	Time Series	Oldest, , First	
Espera.1	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Espera.2	1	1	Time Series	Oldest, ,	

```

Espera.3          1  1  Time Series Oldest, ,
Espera.4          1  1  Time Series Oldest, ,
deposito_de_filmes inf 1  Time Series Oldest, ,

```

```

*****
*****
*
*                               Clock downtimes for Locations
*
*****
*****

```

Loc	Frequency	First Time	Priority	Scheduled	
Disable Logic					
sala_mamografia	720 hr	72 hr	99	Yes	Yes
display "manutenção"					
Wait N(1440, 5) min					
sala_mamografia.1	120 hr	0 hr	99	Yes	Yes
display "manutenção"					
Wait N(1440, 5) min					
sala_mamografia.2	120 hr	0 hr	99	Yes	Yes
display "manutenção"					
Wait N(1440, 5) min					

```

*****
*****
*
*                               Entities
*
*****
*****

```

Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
Paciente	114	Time Series	
Filme	114	Time Series	

```

*****
*****
*
*                               Path Networks
*
*****
*****

```

Name	Type	T/S	From	To	BI	Dist/Time
Speed Factor						

rede_1	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	10.26
1			N2	N3	Bi	25.31
1			N3	N4	Bi	8.60
1			N4	N5	Bi	26.14
1			N5	N6	Bi	31.77
1			N4	N7	Bi	8.30
1			N7	N8	Bi	9.72
1			N8	N9	Bi	14.25
1			N8	N10	Bi	13.26
1			N4	N11	Bi	11.60
1			N11	N12	Bi	7.93
1			N12	N13	Bi	10.59
1			N13	N14	Bi	14.86
1			N14	N15	Bi	11.39
1			N14	N5	Bi	21.77
1			N3	N16	Bi	60.02
1			N14	N17	Bi	32.72

```

*****
*****
*                               Interfaces
*
*****
*****

```

Net	Node	Location
rede_1	N16	Saída
	N9	sala_mamografia
	N12	Camara_escura
	N13	Processadora
	N15	Laudo
	N2	Espera
	N17	deposito_de_filmes
	N6	sala_troca
	N1	Entrada

```

*****
*****
*
*                               Mapping
*
*****
*****

```

Net	From	To	Dest
rede_1	N3	N2	
	N4	N3	
	N5	N4	
	N7	N4	
	N8	N7	
	N11	N4	
	N12	N11	
	N13	N12	
	N14	N13	
	N3	N4	
	N4	N5	
	N13	N14	
	N14	N5	
	N5	N6	
	N4	N7	
	N7	N8	
	N8	N9	
	N4	N11	
	N11	N12	
	N5	N14	
N12	N13		
N14	N15		
N3	N16		
N14	N17		

```

*****
*****
*
*                               Resources
*
*****
*****

```

Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search	Path	Motion
Medico_radiologista	1	By Unit	Closest	Oldest	rede_1	Empty:
114 mpm					Home: N17	Full: 114
mpm					(Return)	
Tecnico_mamografia	2	By Unit	Closest	Closest	rede_1	Empty:
114 mpm					Home: N5	Full: 114
mpm						

(Return)

```
*****
*****
*
*
*
*****
*****
```

```
Res          Node      Parking Node List
-----
Medico_radiologista N17      N17
```

```
*****
*****
*
*
*
*****
*****
```

Process

Routing

```
Entity  Location      Operation      Blk  Output
Destination  Rule      Move Logic
-----
Paciente Entrada      INC Vnumero_pacientes
                        graphic 1
FIRST 1  MOVE ON rede_1      1  Paciente Espera

Paciente Espera      graphic 1
                        GET tecnico_mamografia

sala_troca      FIRST 1  MOVE WITH tecnico_mamografia FOR 1
                        1  Paciente

free tecnico_mamografia
Paciente sala_troca      graphic 2
                        If changed=0 then
                        begin
                        WAIT N(3, 1)
                        INC deposito
                        route 1
                        end
                        else
                        If changed=1 then
                        begin
                        #MATCH Film_ID
                        #JOIN 1 filme
                        INC vexames_repetidos
```

```

                                route 1
                                end
                                else
                                begin
                                    graphic 1
                                    #MATCH Film_ID
                                    #JOIN 1 filme
                                    #graphic 1
                                    route 2
                                end
                                end

                                1      Paciente
sala_mamografia      FIRST 1  graphic 2

IF RESQTY (tecnico_mamografia)=0 then GET tecnico_mamografia

MOVE ON Rede_1

                                2      Paciente Saída
FIRST 1  MOVE ON Rede_1

Paciente sala_mamografia  #graphic 4
                           #INC (Film_number)
                           #Film_ID = Film_number
                           #^ N(20, 5)
                           #afilme_qualidade=dqualidade_filme()
                           #If afilme_qualidade=1 then
                           #begin
                           #INC changed, 2
                           #end
                           #else
                           #If afilme_qualidade=2 then
                           #INC changed, 1

                           graphic 4

                           asucesso_exame=dsucesso_exame()
                           if asucesso_exame=1 then
                               begin
                                   INC (Film_number)
                                   Film_ID = Film_number
                                   ^ N(20,5)

                               then
                                   afilme_qualidade=dqualidade_filme()
                                   If afilme_qualidade=1
                                       INC changed, 2
                                   If afilme_qualidade=2
                                       INC changed, 1
                                   end
                               else
                                   begin
                                       if asucesso_exame=2 then

```



```

#display "Falha no
equipamento"
INC (Numero_de_falhas)
Wait N(100, 0.5) min
end
1 Paciente
sala_troca FIRST 1 graphic 3
MOVE ON Rede_1
free tecnico_mamografia

Camara_escura FIRST 1 graphic 1 2* Filme
MOVE WITH Tecnico_mamografia FOR 1 THEN FREE
Paciente Saída graphic 1 1 Paciente EXIT
FIRST 1 MOVE ON Rede_1
Filme Camara_escura graphic 2
free all
WAIT N(3, 0.5) 1 Filme
Processadora FIRST 1 move on rede_1
Filme Processadora graphic 3
#MATCH Film_ID
inc vnúmero_de_filmes 1 Filme Laudo
FIRST 1 graphic 3
GET tecnico_mamografia
MOVE WITH tecnico_mamografia FOR 1 THEN FREE

Filme Laudo graphic 4
USE Medico_radiologista FOR N(20,2) min
1 Filme
deposito_de_filmes FIRST 1 MOVE WITH Medico_radiologista FOR 0.8 THEN
FREE
Filme deposito_de_filmes wait N(900000, 99) min
1 Filme EXIT
FIRST 1 move on rede_1

```

```

*****
*****
*
* Arrivals
*

```

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

Entity	Location	Qty Each	First Time	Occurrences	Frequency
--------	----------	----------	------------	-------------	-----------

-----					
Paciente	Entrada	1	Wk 1, Mon @ 08:02 AM	15	E (21)

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

\* Shift Assignments \*

Locations...	Resources...	Shift Files...
--------------	--------------	----------------

-----		
sala_mamografia	Medico_radiologista	D:\Fernando\Doutorado\ArtigoIn
99,99,99,99	No	
	Tecnico_mamografia	

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

\* Attributes \*

ID	Type	Classification
changed	Integer	Entity
#		
#Identidade do filme		
Film_ID	Integer	Entity
afilme_qualidade	Integer	Entity
#		
#Probabilildade de acontecer o exame		
asuccesso_exame	Integer	Location
Att1	Integer	Entity

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

\* Variables (global) \*

ID	Type	Initial value	Stats
----	------	---------------	-------

#

```

#Número de filmes utilizados
  Vnumero_de_filmes Integer      0          Time Series
#
#Número de exames refeitos
  Vexames_repetidos Integer      0          Time Series
#
#Número de pacientes (contagem)
  Vnumero_pacientes Integer      0          Time Series
#
#Conta o numero de filmes utilizados
  film_number      Integer      0          Time Series
#
#numero de filmes no deposito
  deposito      Integer      0          Time Series
#
#Número de falhas nos equipamentos
  Numero_de_falhas Integer      0          Time Series

```

```

*****
*****
*
*                      Arrival Cycles
*
*****
*****

```

ID	Qty / %	Cumulative	Time (Hours)	Value
ciclo1	Percent	No	8:00-12:00	50
			13:00-18:00	50

```

*****
*****
*
*                      User Distributions
*
*****
*****

```

ID	Type	Cumulative	Percentage	Value
dqualidade_filme	Discrete	No	100	1
			0	2
dsucesso_exame	Discrete	No	98	1
			2	2

```

*****
*****
*
*                      External Files
*
*****
*****

```

```

ID          Type          File Name
Prompt

```

-----  
-----  
(null) Shift  
D:\Fernando\Doutorado\ArtigoInternacional\_1\shift\_coelli.sft