



PRODUTIVIDADE DE SETORES DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Rogério Pires dos Santos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Biomédica.

Orientador: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2019

PRODUTIVIDADE DE SETORES DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Rogério Pires dos Santos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA.

Examinada por:

---

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

---

Prof. Roberto Macoto Ichinose, D.Sc.

---

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

---

Prof. Sergio Augusto Lopes de Souza, D.Sc.

---

Prof. Marcelo Henrique Mamede Lewer, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Santos, Rogério Pires dos

Produtividade de Setores de Tomografia Computadorizada Utilizando Simulação por Eventos Discretos / Rogério Pires dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 158 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Biomédica, 2019

Referências Bibliográficas: p. 102-108.

1. Tomografia Computadorizada. 2. Simulação por Eventos Discretos. 3. Produtividade. 4. Gestão I. Almeida, Renan Moritz Varnier Rodrigues de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Biomédica. III. Título.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Adriana, aos meus filhos Andrei e Ian por todo o esforço e sacrifícios que foram feitos durante estes últimos anos. Tenham certeza que sem vocês eu não conseguiria alcançar esse objetivo. Amo MUITO vocês todos.

À minha Mãe, Jovelina, a eterna D. Lili, por tudo, pela vida. Muitas saudades.

À minha irmã, Rosângela, pelo apoio aos meus estudos. Desculpe a demora.

Ao meu País, tão sofrido e vilipendiado pelas elites e injusto com tantos, mas que me propiciou o desenvolvimento desta Tese, que espero que possa ser utilizada para ajudar a aumentar o acesso à saúde dos cidadãos mais necessitados.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida, por sempre ter acreditado na minha capacidade e nas minhas ideias. Agradeço sua dedicação, confiança e ajuda.

Aos Professores do LESS, Flávio Nobre, Roberto Macoto, Diogo Tschoeke e, especialmente à Professora Rosimary Terezinha pelo apoio e pelos ensinamentos que sempre farão parte da minha formação. Aos Professores Paulo Frutuoso (PEN) e Glaydston Ribeiro (PET) pelos conhecimentos transmitidos e todos os Professores do PEB por todos esses anos de ótimo convívio e de crescimento intelectual.

Ao Eng. Tiago Louzada da empresa BELGE pelos ensinamentos na utilização do software de simulação e pela paciência.

Aos alunos de Iniciação Científica, Andrei e Vinícius pela colaboração nas pesquisas.

À família LESS, colegas com quem passei tantos bons momentos, e em especial aos AMIGOS Letícia Raposo (a lenda), Alfonso Rosales, Mariá Gonçalves, Sulafa Ahmed, Elisa Santos, César Barros, Aline Nascimento e Ricardo Moraes. Pessoas maravilhosas com quem convivi e que muito enriqueceram e alegraram esses últimos anos. As festas e as comilanças serão inesquecíveis. Sentirei MUITAS saudades.

Ao AMIGO Fernando Coelli pela amizade, força e parceria plantadas e colhidas no universo da Eng. Biomédica.

Ao AMIGO Thiago Afonso pela amizade, pelo apoio e pela paciência.

Ao AMIGO Jorge Luís pela amizade, pelo apoio e pela paciência. Saudades, meu amigo.

Ao CEFET “CSF” – RJ por me permitir terminar o meu aperfeiçoamento acadêmico em regime de dedicação integral, sem esquecer que foi no curso técnico em Eletrônica do CEFET, em 1982, que tudo isso começou.

Aos gestores das unidades de saúde que abriram suas portas e me permitiram fazer as pesquisas imprescindíveis à confecção desta tese.

E, por fim, agradeço a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, torceram por mim e acreditaram no meu potencial para concluir mais essa etapa em minha vida. A todos, muito obrigado.

*“Hay que endurecerse, pero sin perder la ternura jamás.”*  
*(Che Guevara)*

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

PRODUTIVIDADE DE SETORES DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA  
UTILIZANDO SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Rogério Pires dos Santos

Fevereiro/2019

Orientador: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida

Programa: Engenharia Biomédica

O tomógrafo computadorizado (TC) tornou-se um dos equipamentos médicos mais importantes por examinar muitas áreas anatômicas. Este trabalho estudou o processo de exames de tomografia computadorizada em 11 TCs de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes de três marcas em 10 unidades. Para isso estudou-se: os mercados de TC; as opiniões de profissionais que especificam TC; os processos de exame, definindo estruturas, etapas dos exames e seus tempos. Então, usando o *software* MedModel<sup>®</sup> foram criados 5 modelos de simulação computacional com 125 combinações de TC, estruturas e demandas de pacientes, para estudar produtividades, lucratividades, capacidades de atendimento, tempos dos pacientes no processo e alterações estruturais que otimizem o processo. Os resultados mostraram que o tempo de exame de tomografia não depende somente do tempo da aquisição da imagem e que essa etapa não se torna proporcionalmente mais rápida trocando-se um TC por outro que produza mais cortes simultâneos. Por exemplo, o tempo de aquisição de imagem em um dos exames acompanhados de crânio em um TC de 1 corte demorou 2'15", enquanto outro exame igual feito em um TC de 128 cortes demorou 1'37". Os tempos das demais etapas devem ser considerados e os processos de exame otimizados. A simulação do cenário 4 do quinto modelo mostrou que a escolha de um TC de 4 cortes seria a mais lucrativa e produziria tempos curtos. Os resultados obtidos podem ser úteis aos gestores de saúde. A simulação se mostrou uma importante ferramenta para a análise dos processos e possíveis alterações.

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

PRODUCTIVITY OF COMPUTED TOMOGRAPHY SECTORS USING DISCRETE  
EVENTS SIMULATION

Rogério Pires dos Santos

February/2019

Advisor: Renan Moritz Varnier Rodrigues de Almeida

Department: Biomedical Engineering

Computed tomography (CT) is now one of the most important medical equipments for anatomical exams. This work studied 11 CT scanners of 1, 2, 4, 16 and 128 slices from 3 manufacturers in 10 health units. For that, we studied: CT market worldwide; opinions of professionals who manage CTs; examination procedures, steps and times. Then, 5 computer simulation models were created using the MedModel<sup>®</sup> software with 125 combinations of CT types, structures and patient demands, to study productivity, profitability, capacity, patients' exam times and structural changes needed to optimize processes. The results showed that the CT scan time does not only depend on the time of image acquisition and that it does not become proportionally faster replacing a CT by one with capacity for more simultaneous slices. For example, the time of image acquisition in a brain scan made on an 1-slice CT took 2'15", while the same exam on an 128-slice CT took 1'37". The simulation (scenario 4, fifth model) showed that choosing a 4-slice CT would be the most profitable and faster option. Times of other steps should be considered and examination procedures optimized. The results obtained may be useful to health managers. The simulation proved to be an important tool for the analysis of processes and changes.



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Desenvolvimento do Trabalho.....	3
1.2.1. Etapas .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
<b>3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>14</b>
3.1. Simulação .....	14
3.2. Tomografia Computadorizada.....	25
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
4.1. Dados .....	32
4.1.1. Aparelhos estudados .....	32
4.2. Métodos .....	33
4.2.1. Medições.....	33
4.2.2. Pesquisas Preliminares .....	34
4.2.3. Cálculo da Produtividade .....	36
4.2.4. Simulações.....	37
4.2.4.1. O modelo inicial .....	37
4.2.4.2. Modelo para estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento .....	39
4.2.4.3. Modelo para estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente .....	41
4.2.4.4. Modelo com TC(s) de 4 cortes com diferentes estruturas para unidades com grande demanda de exames .....	44
4.2.4.5. Modelo com TC(s) das 5 tecnologias estudadas com diferentes estruturas para unidades com grande demanda por exames .....	47
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>50</b>
5.1. Pesquisas preliminares.....	50
5.2. Tempos dos Processos .....	52
5.3. Simulações dos setores de TC .....	57
5.3.1. Modelo inicial.....	57
5.3.2. Modelo para estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento .....	57
5.3.3. Modelo para estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente .....	59
5.3.4. Modelo com TC(s) de 4 cortes com diferentes estruturas para unidades com grande demanda de exames .....	61
5.3.5. Modelo com TC(s) das cinco tecnologias estudadas com diferentes estruturas para unidades com grande demanda por exames.....	70
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	<b>79</b>
6.1. Pesquisas preliminares.....	79
6.2. Definição das etapas de exames .....	82
6.2.1. Medidas dos tempos das etapas e dificuldades encontradas.....	83
6.2.1.1. Aparelhos de 1 corte .....	83
6.2.1.2. Aparelhos de 2 cortes .....	84
6.2.1.3. Aparelhos de 4 cortes .....	85
6.2.1.4. Aparelhos de 16 cortes .....	86
6.2.1.5. Aparelhos de 128 cortes .....	87
6.2.1.6. Produtividades esperadas.....	87

6.3. Modelos e simulações dos setores de TC .....	88
6.3.1. O Modelo Inicial.....	89
6.3.2. Estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento dos pacientes .....	90
6.3.3. Estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente .....	91
6.3.4. Simulação de um setor de TC hospitalar com grande demanda por exames usando TC(s) de 4 cortes .....	92
6.3.5. Síntese.....	95
6.3.6. Simulação de um setor de TC hospitalar com grande demanda por exames usando TC das cinco tecnologias estudadas.....	96
6.3.7. Síntese.....	99
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>109</b>
Tempos medidos dos processos nos tomógrafos computadorizados.....	109
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>123</b>
Questionários aplicados.....	123
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>131</b>
Trabalhos Resultantes desta tese .....	131
C.1. Trabalho apresentado no CBEB 2014.....	131
C.2. Resumo apresentado no IUPESM 2015.....	138
C.3. Trabalho publicado no Journal of Healthcare Engineering .....	140
C.4. Trabalho apresentado no IUPESM 2018 .....	150
C.5. Trabalho apresentado no CBEB 2018.....	155

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema do uso da simulação na otimização de um projeto.....	17
<b>Figura 2:</b> Fluxograma de modelagem e simulação de um processo* .....	21
<b>Figura 3:</b> Equipamento de TC, Gantry, Mesa de Exames e Console de Comando (TOSHIBA, 2016) .....	26
<b>Figura 4:</b> Interior de um Gantry de um TC .....	27
<b>Figura 5:</b> Interior de um console de um TC (parte computacional).....	28
<b>Figura 6:</b> Interior de um console de um TC (seção de reconstrução de imagem).....	29
<b>Figura 7:</b> Dois tipos de TCs móveis (SAMSUNG, 2018).....	29
<b>Figura 8:</b> Imagem do modelo inicial de um serviço de TC criado no <i>software</i> MedModel <sup>®</sup> .....	38
<b>Figura 9:</b> Imagem de um modelo de um serviço de TC criado no <i>software</i> MedModel <sup>®</sup> com 2 vestiários, 1 operador e 1 profissional de enfermagem. ....	41
<b>Figura 10:</b> Imagem de um modelo de um serviço de TC criado no <i>software</i> MedModel <sup>®</sup> com 4 vestiários e 2 TCs.....	49
<b>Figura 11:</b> Representação gráfica dos tempos totais médios ponderados no processo de exame em TCs de 1, 4 e 128 cortes nos 8 cenários simulados. ....	59
<b>Figura 12:</b> Imagem da questão referente à função dos profissionais entrevistados. ...	123
<b>Figura 13:</b> Função dos profissionais pesquisados. ....	123
<b>Figura 14:</b> Imagem da questão referente a aquisição inicial/troca de um TC.....	124
<b>Figura 15:</b> Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na aquisição/troca de TC. ....	124
<b>Figura 16:</b> Imagem da questão referente a substituição de um TC com o qual o entrevistado atue. ....	125
<b>Figura 17:</b> Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na substituição de um TC. ....	125
<b>Figura 18:</b> Imagem da questão referente à expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos. ....	126
<b>Figura 19:</b> Resultado expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos. ....	126
<b>Figura 20:</b> Imagem da questão referente à função dos profissionais entrevistados. ...	127
<b>Figura 21:</b> Função dos profissionais pesquisados, em países do exterior. ....	127
<b>Figura 22:</b> Imagem da questão referente a aquisição inicial/troca de um TC.....	128
<b>Figura 23:</b> Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na aquisição/troca de TC, em países do exterior. ....	128
<b>Figura 24:</b> Imagem da questão referente a substituição de um TC com o qual o entrevistado atue. ....	129
<b>Figura 25:</b> Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na substituição de um TC, em países do exterior. ....	129
<b>Figura 26:</b> Imagem da questão referente à expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos. ....	130
<b>Figura 27:</b> Resultado expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos, em países do exterior. ....	130

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Modelos de “entrada” de TCs (pelo número de cortes) conforme região geográfica e fabricantes. *	52
<b>Tabela 2:</b> Médias dos tempos medidos, totais dos exames realizados e produtividades semanais máximas calculadas para os TCs estudados.....	56
<b>Tabela 3:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.1.....	57
<b>Tabela 4:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.2. *	58
<b>Tabela 5:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.2. *	58
<b>Tabela 6:</b> Número total de exames executados nos quatro cenários em três anos da simulação.....	59
<b>Tabela 7:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.3. *	60
<b>Tabela 8:</b> Taxas de chegadas simuladas no modelo da seção 5.3.4. *	62
<b>Tabela 9:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 1. *	63
<b>Tabela 10:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 2. *	64
<b>Tabela 11:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 3. *	65
<b>Tabela 12:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 4. *	67
<b>Tabela 13:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 5. *	68
<b>Tabela 14:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 6. *	69
<b>Tabela 15:</b> Taxas de chegadas simuladas no modelo da seção 5.3.5. *	70
<b>Tabela 16:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 1. *	71
<b>Tabela 17:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 2. *	73
<b>Tabela 18:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 3. *	74
<b>Tabela 19:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 4. *	75
<b>Tabela 20:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 5. *	77
<b>Tabela 21:</b> Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 6. *	78
<b>Tabela 22:</b> Tempos medidos e calculados no TC XVision/EX. *	109
<b>Tabela 23:</b> Tempos medidos e calculados nos TCs de 1 corte estudados. *	110
<b>Tabela 24:</b> Tempos medidos e calculados no TC Emotion de 2 cortes. *	111
<b>Tabela 25:</b> Tempos medidos e calculados nos TCs de 2 cortes estudados. *	112
<b>Tabela 26:</b> Tempos calculados nos TCs de 2 cortes estudados. *	113
<b>Tabela 27:</b> Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos. .	114
<b>Tabela 28:</b> Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos. .	115
<b>Tabela 29:</b> Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos. .	116
<b>Tabela 30:</b> Tempos calculados nos exames no TC Asteion 4 de 4 cortes. *	117
<b>Tabela 31:</b> Exames realizados no TC Toshiba Asteion4 durante 3 meses e suas distribuições percentuais.....	117
<b>Tabela 32:</b> Exames realizados no TC Toshiba Asteion4 durante 3 meses e suas distribuições percentuais.....	118
<b>Tabela 33:</b> Tempos calculados nos exames no TC Asteion 4 de 4 cortes. *	118
<b>Tabela 34:</b> Tempos medidos nos TCs Activion 16 de 16 cortes, em minutos e segundos. ....	119
<b>Tabela 35:</b> Tempos calculados nos exames nos TCs Activion 16 de 16 cortes. * .....	120
<b>Tabela 36:</b> Tempos medidos e calculados no TC Somaton128 de 128 cortes. * .....	121
<b>Tabela 37:</b> Tempos ajustados a curva de distribuição de probabilidade das etapas dos exames (exceto a aquisição) de todos TCs estudados. * .....	122

# 1. INTRODUÇÃO

Os setores de radiologia ou, de forma mais geral, de imagem, são atualmente imprescindíveis no processo de diagnóstico e acompanhamento do tratamento de muitas doenças. Esses se tornaram vitais para os hospitais e centro médicos, por sua importância no diagnóstico de um paciente (RAMIS *et al.*, 2008). Os equipamentos “de imagem” são: raios x convencional, ultrassom, mamografia, tomografia computadorizada, ressonância magnética e tomografia por emissão de pósitrons. Por conta de sua importância, os setores de imagem normalmente realizam muitos exames, com altos custos envolvidos, tanto na aquisição dos aparelhos e dos insumos, quanto na mão de obra e manutenção, tornando os exames caros e envolvendo grandes volumes de recursos.

Muitos autores destacam a importância atual dos tomógrafos computadorizados (TC), haja vista que estes são utilizados para análise de quase toda a anatomia humana (DUARTE *et al.*, 2005, MENEZES *et al.*, 2006, JUCHEM *et al.*, 2004). Em 2007, 13,9% dos pacientes dos setores de emergência dos EUA foram examinados nestes aparelhos, enquanto somente 0,7% utilizaram aparelhos de ressonância magnética (RM) (GINDE *et al.*, 2008). Estudos também mostram o aumento da utilização dos TC e das RM nos EUA, de 2,4% dos pacientes atendidos nos setores de emergência em 1992 para 14,6% em 2007 (GINDE *et al.*, 2008; NISKA *et al.*, 2010; BERDAHL *et al.*, 2013). LEITE e VILA (2005) ressaltam a gravidade da indisponibilidade dos TC, visto a dificuldade no diagnóstico de doenças e ressalta que mesmo modelos antigos poderiam suprir diversas demandas.

A TC utiliza um feixe de radiação ionizante, em forma de “leque” (*Fan Beam*, nos modelos *single slice*) e em forma de “cone” (*cone beam*, nos modelos *multi slice*) para produzir sinais elétricos em um detector. Estes sinais elétricos são enviados para o computador que produz imagens seccionais e/ou reconstruções diversas. A sua operação, normalmente, é feita por técnicos ou tecnólogos, porém existem casos onde médicos o fazem. As imagens são obtidas eletronicamente, sendo facultativa a impressão, não sendo incomum, atualmente, que o médico radiologista as analise em terminais de vídeo. Os custos envolvidos são altos devido ao alto valor do equipamento, dos insumos, da mão de obra e da manutenção, tornando os exames caros. Atualmente, os TC estão disseminados nas mais diversas unidades de saúde. Os tempos dos exames variam muito por conta da grande diversidade de áreas anatômicas examináveis e da velocidade dos aparelhos.

Atualmente, existem aparelhos capazes de fazer exames de crânio, por exemplo, em poucos segundos, sendo a obtenção da imagem um dos menores tempos gastos em todo o processo. Porém, nos equipamentos mais antigos, estes tempos pesam mais sobre o processo (SANTOS *et al.*, 2014). Os TC são equipamentos dos mais importantes e possuem ampla indicação e escolha para fins diagnósticos (SEERAM, 2015).

Nas últimas três décadas, os fabricantes de TC vêm se esforçando para, entre outras coisas, diminuir o tempo de exame destes aparelhos. No primeiro aparelho de tomografia instalado na década de 1970, somente eram feitos exames de crânio (aparelhos chamados de craniótomos) e a produção de cada imagem poderia demorar vários minutos, entre a aquisição e a sua reconstrução computacional. Nos equipamentos atuais, este tempo diminuiu para poucos segundos, sendo que alguns aparelhos são capazes de examinar algumas partes anatômicas inteiras em menos de um segundo. O estado da arte destes equipamentos, atualmente, inclui os de aquisição volumétrica em tempo real de 320 cortes (com interpolação simulando 640 cortes), são aparelhos que permitem, em tempo real, a visualização detalhada de órgãos em movimento, como o coração (JIANG, 2009; CIERNIAK, 2011) e chegam a custar milhões de reais. Nos modelos mais velozes, a aquisição é a etapa mais rápida de todo o processo de exame. Entretanto, a ideia de que dobrar o número de cortes simultâneos dobra a produtividade não é real, haja vista que o tempo de exame não é exclusivamente dependente dos tempos de aquisição (JHAVERI *et al.*, 2001; ANVISA, 2016).

Daí a importância do estudo destes processos, pois os ganhos de desempenho nos aparelhos modernos podem não produzir grande aumento de produtividade caso as outras etapas do processo não acompanhem estas melhorias (SANTOS *et al.*, 2014). Pode-se ressaltar ainda que não existem muitos dados disponíveis sobre o tempo de aquisição ou de realização dos diversos tipos de exames de TC nas muitas tecnologias disponíveis.

Em 2009, no Brasil, existiam 15,6 TC por milhão de habitantes, uma densidade semelhante à de países como Canadá e Nova Zelândia que possuíam 14,2 e 15,8, respectivamente. Entretanto, as diferenças entre as regiões do país são grandes. A região sudeste, a mais populosa, possuía 21,8 TC por milhão de habitantes, mais que Luxemburgo com 19,7. Já a região nordeste, a segunda mais populosa do Brasil, possuía somente 8,1 TC por milhão de habitantes, menos que a Tunísia, por exemplo, com 9,3. De todos os aparelhos médicos dedicados a exames de imagem no Brasil em 2009, 4,74% eram TC, ocupando o oitavo lugar em número de aparelhos instalados e o primeiro em termos de custo (IBGE, 2009; OECD, 2011; WHO, 2011).

Porém, mesmo nas cidades onde os TC estão disponíveis, é comum a formação de grandes filas de espera nos serviços públicos, podendo demorar meses para o atendimento (SCHWARTZ *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2014). Logo, aumentar a produtividade também representa aumentar a disponibilidade e o número de atendimentos nos serviços públicos e a lucratividade nos privados.

Assim, devido a sua grande presença no sistema de saúde, sua importância diagnóstica e pelos valores envolvidos, os TC foram os escolhidos para serem estudados neste trabalho.

## **1.1. Objetivos**

O objetivo principal do presente trabalho é estudar a produtividade de aparelhos de tomografia computadorizada de tecnologias diversas utilizando simulação de eventos discretos.

Os objetivos secundários deste trabalho são, gerar conhecimento que auxilie os gestores de saúde na escolha da tecnologia em tomografia computadorizada que melhor atenda às necessidades de cada unidade, do ponto de vista da produtividade esperada, evitando gastos desnecessários. Com os resultados das simulações serão produzidas sugestões que permitam aumentos de produtividade com pouco investimento.

## **1.2. Desenvolvimento do Trabalho**

Para que haja clareza, serão relacionadas aqui, de forma sucinta, as etapas do trabalho proposto.

### **1.2.1. Etapas**

Foi feita uma pesquisa bibliográfica para identificar estudos prévios semelhantes, metodologias e resultados que pudessem embasar o desenvolvimento dessa tese. Para este fim, foram pesquisados trabalhos científicos disponíveis na internet, usando palavras-chaves de conexão com o tema que se estudado. Esta fase se estendeu até o fim do trabalho devido à dinâmica das publicações efetuadas ao longo do tempo.

Foram selecionadas unidades de saúde com TC de marcas e modelos diversos. Nestas unidades, foram observados os procedimentos para a realização dos exames de TC e, a partir destes, os exames foram divididos em etapas. Os tempos destas etapas foram medidos em cada uma das unidades estudadas.

Além destas pesquisas nas unidades de saúde, foram pesquisados na internet os sites dos fabricantes de TC em todos os continentes a fim de conhecer a oferta de aparelhos “de entrada” nos diversos continentes. Para conhecer os parâmetros que regem a especificação de aparelhos de TC para compra, foi aplicado um questionário a profissionais envolvidos com os exames de TC e, finalmente, foram criados modelos computacionais de unidades fictícias com um ou dois tomógrafos das cinco tecnologias estudadas. Cenários diversos foram simulados permitindo inferir os efeitos de mudanças nas estruturas iniciais, que, por sua vez, representavam as estruturas encontradas nas unidades estudadas.

Este trabalho se divide em sete seções principais (Introdução, Revisão Bibliográfica, Fundamentos Teóricos, Materiais e Métodos, Resultados, Discussão e Conclusões e Recomendações), Referências Bibliográficas e três Apêndices com dados de apoio diversos.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento deste projeto fez-se uma revisão da literatura focando em produtividade de setores/equipamentos e simulação/modelagem, preferencialmente em serviços de saúde.

SANTOS *et al.* (2010) estudaram o fluxo de pacientes em um serviço de PET/CT no Instituto Nacional do Câncer do Ministério da Saúde. Foram medidos os tempos gastos em cada uma das nove etapas de seis exames em dois dias separados por um mês. O setor estava em implantação e entre as visitas, ocorreram mudanças no processo e os funcionários sofreram treinamento. O exame mais rápido levou duas horas e três minutos, enquanto o mais demorado levou três horas e vinte e cinco minutos. A partir dos tempos medidos, foram classificados os tempos mínimos e médios para cada etapa. Os autores inferiram que o tempo mínimo de exame seria de uma hora e vinte e sete minutos. Segundo os autores, o setor recebia diariamente, a dose necessária para examinar oito pacientes (140mCi, ou aproximadamente 10mCi/paciente incluindo o decaimento), quantidade determinada em função do custo de cada dose (cerca de R\$ 1.050,00 à época). Os autores sugeriram que, alcançando-se tais tempos, poder-se-ia economizar radiofármacos ou atender mais pacientes com a mesma quantidade destes. Visto que, com menores tempos as doses desperdiçadas em função do decaimento radioativo (no caso, o flúor-18 presente no FDG-18F possui meia-vida de 109 minutos) poderiam ser mais bem aproveitadas. Esse trabalho sugere o quanto é importante o estudo dos processos e o potencial econômico de mudanças propostas a partir de tais análises.

Segundo UZIAŁKO-MYDLIKOWSKA e MIELCZAREK (2012) a gestão de uma instituição de saúde é tão complexa quanto a de uma grande empresa. Um desafio enfrentado por todas as unidades de saúde é equilibrar dois objetivos: satisfazer as necessidades de atendimento de uma população constantemente crescente e manter os custos em um nível definido. O objetivo fundamental é melhorar a eficiência e reduzir custos. A partir de 1950, a pesquisa operacional e disciplinas relacionadas têm auxiliado gestores de saúde a investigar complexas relações entre diferentes partes de um sistema e tomar decisões racionais tanto administrativa, quanto economicamente, assim como, e principalmente, no aspecto médico.

SENDI *et al.* (2004) simularam o atendimento de pacientes por acadêmicos de medicina e a supervisão dos atendimentos por parte de médicos titulares (staff) utilizando

simulação por eventos discretos, no caso, redes coloridas de Petri. Foram testadas as opções da presença de um a dez médicos efetivos. Testaram ainda a composição da equipe de acadêmicos, com cinco novatos e cinco experientes e com três novatos e sete experientes. Os resultados mostraram o aumento do número de pacientes atendidos em um período de cinco horas conforme aumentava-se o número de efetivos. Porém, essa quantidade não deveria ultrapassar três, pois, um número maior não produziria aumento significativo no número de atendimentos. Quanto à equipe de residentes, como esperado, com médicos mais experientes o número de pacientes atendidos aumentaria. Utilizou-se um modelo simplificado, pois o objetivo era a apresentação do método. Finalmente, os autores mostraram que o método se mostrou válido no apoio à decisão de contratação da equipe de médicos, pois mostrou que, para o modelo utilizado, a contratação de três médicos titulares seria a opção mais indicada. Deve-se observar que, apesar de ser um modelo simplificado, serviu para apontar pequenas alterações que poderiam gerar um aumento no número de pacientes atendidos.

STROPARO *et al.* (2004) estudaram a taxa de ocupação de um centro cirúrgico utilizando simulação computacional com o objetivo principal de aumentar a produtividade deste setor. Os autores sugeriram que a simulação poderia auxiliar na confecção dos mapas cirúrgicos, diminuindo a ociosidade das salas cirúrgicas, administrando os intervalos entre uso destas e prevendo o uso de equipamentos. Foram descritas as etapas de preparação das salas para o recebimento dos pacientes. O hospital possuía seis salas cirúrgicas distribuídas entre as diversas especialidades clínicas e prevendo salas destinadas às cirurgias de emergência. Os autores atentaram para a confecção dos mapas cirúrgicos que norteiam a necessidade de leitos, equipamentos, tipos de preparo do paciente, recursos do centro cirúrgico, entre outras medidas necessárias à cirurgia e/ou ao pós-operatório do paciente. Para a simulação foi utilizado o *software* ProModel® (PROMODEL). Foram criados dois grupos de variáveis, o primeiro constituído por: especialidade clínica do procedimento; procedimento a ser executado; sala cirúrgica e tipo de atendimento. O segundo grupo foi definido com as variáveis: tempo de limpeza da sala; tempo de recuperação pós-anestésica; tempo de execução da cirurgia; tempo do procedimento anestésico; tempo de entrada do material e do anestesista na sala; tempo de limpeza e preparo da sala, tempo de traslado do paciente até o centro cirúrgico; média de cancelamentos existentes; tempo médico de atraso; tipos e quantidades de profissionais envolvidos e cronograma de atendimento. A partir dos tempos medidos, foi determinado o tempo total médio da execução dos procedimentos.

Os dados reais apontaram uma taxa de ocupação de 72,5%, enquanto o modelo apresentou uma taxa de 77%. No simulador, foi utilizado um *downtime* de 67 minutos. Foram feitas duas simulações a fim de diminuir a ociosidade das salas. A primeira condição simulada foi a busca no fim da fila de espera por procedimento igual ao cancelado, já a segunda condição simulada foi o simples adiantamento dos procedimentos posteriores. Os autores não apresentaram resultados claros, porém consideraram o método válido para estudo de alterações possíveis nos fluxos do centro cirúrgico a fim de melhorar a sua utilização. Pode-se concluir que a aplicação da simulação pode auxiliar a confecção dos mapas cirúrgicos e diminuição do *downtime* das salas cirúrgicas, mas, para isso, o modelo utilizado deve ser detalhado e vários cenários, testados.

FERREIRA *et al.* (2004) modelaram o fluxo de atendimentos de um serviço de oftalmologia em um grande hospital, simulando mudanças no atendimento. Quatro cenários foram estudados, no primeiro, o padrão, utilizou-se uma sala de espera, uma de consulta e uma de exame. Foram empregados um médico e uma enfermeira, o número de pacientes atendidos foi pequeno e o tempo de espera foi alto. O segundo cenário propôs a contratação de um auxiliar, um estagiário de medicina ou uma enfermeira, neste caso, o tempo de espera diminuiria 3% e o número de pacientes atendidos aumentaria 32,2%. O terceiro cenário simulou mudanças mais profundas, as consultas e os exames se realizariam na mesma sala, criando outra sala igual sem necessidade de obras. Mais um médico seria contratado. Essa hipótese se mostrou eficiente, pois aumentaria em 164,4% o número de pacientes atendidos e o tempo de espera cairia para um terço do original. Entretanto, deve-se observar o custo da aquisição de novos equipamentos, o que não foi considerado no estudo, além do custo de contratação do médico. No último cenário, foi simulada a mistura dos dois anteriores, fazendo as alterações nas salas e contratando um auxiliar em vez de um médico. Nesse último cenário haveria um aumento de 108,5% no número de pacientes atendidos, mas o tempo de espera também aumentaria em 30,4%. Uma variação do terceiro modelo poderia ter sido testada, com duas salas de consulta e com dois médicos, mas com somente uma sala de exame, o que não aumentaria os custos com a aquisição de novos aparelhos. O autor concluiu que a simulação computacional se mostrou eficiente no apoio à decisão e considerou o terceiro cenário mais interessante e eficaz. Nesse trabalho, observa-se a aplicabilidade da simulação no estudo de cenários variados, sem a necessidade da implantação física e alocação de recursos.

BOLAND *et al.* (2008) estudaram a adição de técnicos operadores a fim de aumentar a produtividade de um setor de TC de um hospital. Os autores ressaltaram a

importância do atendimento a pacientes externos como forma de aumentar a lucratividade desses setores. Esse trabalho não usou simulação computacional, os três modelos propostos foram aplicados empiricamente, o que, normalmente, gera custos e pode atrapalhar o funcionamento normal do setor estudado. Os cenários foram: um (padrão), dois ou três técnicos operadores trabalhando simultaneamente. No setor de tomografia, existiam dois tomógrafos, um de 8 e outro de 16 cortes. Apesar de mais exames terem sido feitos no aparelho de 16 cortes, os autores não compararam os desempenhos dos aparelhos. Foram definidas 34 etapas do processo de exame (da entrega do paciente ao operador até a impressão final do filme do exame), nos modelos com 2 ou 3 técnicos (operadores de TC) essas foram distribuídas de maneira que as etapas pudessem ser cumpridas simultaneamente por mais de um técnico. Os autores focaram a pesquisa na inserção de mais técnicos e no aumento do horário de funcionamento. Inicialmente, o setor funcionava com 1 técnico durante a semana e no período das 7:00 às 18:00h.. Nessa condição, a capacidade máxima era de 120 pacientes/semana. Com 2 técnicos, a capacidade subiu para 285 pacientes e com 3, alcançou 415 pacientes/semana. Os tempos médios de permanência dos pacientes na sala do TC foram de 12, 9,7 e 8 minutos, respectivamente, e, 2,2, 5,2 e 7,5 pacientes poderiam ser examinados por hora em cada um dos modelos. A partir das capacidades obtidas no modelo de 11 horas/dia de operação, foram calculadas as capacidades de atendimentos para 15 horas/dia (de 7:00 as 22:00h.) durante a semana e 12 horas (de 7:00 as 19:00h.) durante os fins de semana, perfazendo 99 horas/semana. Nesta condição, são esperadas capacidades de 207, 514 e 745 atendimentos por semana, para 1, 2 ou 3 operadores, respectivamente. É importante comparar a capacidade de 6240 atendimentos/ano com 1 técnico trabalhando 55 horas/semana e a capacidade de 38.740 para 3 técnicos trabalhando 99 horas/semana, um aumento de mais de 500% sem alteração no processo ou nos equipamentos. Os autores salientaram que existem vieses como o fato de não terem comparado as capacidades nos mesmos exames e, ainda que não é recomendado fazer agendamentos usando a capacidade máxima, para que se possa encaixar pacientes não agendados, por isso fizeram cálculos para a utilização de 85% da capacidade esperada. A utilização do terceiro operador é discutível pois, fora do “horário de pico”, este poderia ficar ocioso, por outro lado os autores discutiram, mas não concluíram se este terceiro profissional não poderia ser substituído por outro “mais barato”. Nesta discussão, a simulação eletrônica teria sido útil. Esse trabalho corrobora a importância do estudo de métodos que aumentem a produtividade dos serviços de TC.

KROFT *et al.* (2010) compararam a dose de radiação recebida por pacientes pediátricos e/ou neonatais em um TC de 320 cortes, simulando quatro tecnologias distintas, três “helicoidais”, “*fan-beam*”, com a aquisição simultânea ao movimento da mesa de exames e a quarta utilizando aquisição axial volumétrica, “*cone-beam*”, com a mesa parada. As helicoidais simularam aparelhos de 16, 32 e 64 cortes. O estudo demonstrou a diminuição da dose de radiação ionizante recebida pelo paciente quando da utilização da técnica axial volumétrica, e aponta ainda um ganho em qualidade de imagem por não possuir as desvantagens das aquisições helicoidais. Uma das razões encontradas pelos autores para a diminuição da dose é o fato da aquisição axial não produzir o “*overscanning*”, que representa uma exposição desnecessária do paciente. Pertinente a este trabalho, foram apresentados os tempos de aquisição das quatro tecnologias estudadas, mostrando, por exemplo, que utilizando os 320 cortes em aquisição axial “*cone-beam*” faz-se uma aquisição de imagem de uma região anatômica de 16 cm de extensão com uma rotação do sistema de aquisição, o que no aparelho em questão demora 0,35 segundos. Nas aquisições helicoidais estes tempos variaram de 1,9 a 8,3 segundos, referentes a algumas espiras da aquisição helicoidal. Os autores apontam uma diminuição de 5 a 24 vezes do tempo de uma tomografia de tórax. Quanto à diminuição de dose de radiação ionizante, esta ficou entre 18 e 40%. Esse trabalho demonstra outras vantagens dos aparelhos de alta velocidade, que não somente o ganho de produtividade, e a importância dos estudos envolvendo os tempos de exames.

RIEGER *et al.* (2009) apresentaram um estudo do uso de um TC de 64 cortes que substituiu um equipamento de 4 cortes em um setor de emergência. Os autores mediram os tempos de passagem do paciente pelo setor, desde a entrada na emergência, passando pelo TC, retornando para a emergência com o diagnóstico e sendo finalmente encaminhado para outro setor. Os tempos inerentes ao exame foram divididos na aquisição, reconstrução e análise. O tempo médio da aquisição foi  $12,0 \pm 4,9$  minutos, sendo o tempo máximo 35 e o mínimo 8 minutos, para reconstrução e análise foi  $7,0 \pm 2,1$  minutos, o máximo 15 e o mínimo 4 minutos. Os autores agruparam estes tempos no que chamaram de “tempo TC” sendo que a média ficou em  $19,0 \pm 6,1$  minutos, o tempo máximo foi de 38 e o mínimo 7 minutos. Uma característica do aparelho de 64 cortes é a possibilidade de examinar em um só bloco, dois metros da anatomia o que permite examinar um paciente poli traumatizado rapidamente. Os autores citaram que, com o antigo aparelho, muitas vezes eram necessárias múltiplas aquisições que despendiam longos períodos de exame, já com o aparelho de 64 cortes o procedimento passou a ser o

de uma única aquisição, o que somado à grande velocidade do aparelho, diminuiu os tempos de exame. Os autores concluíram que a instalação do aparelho de 64 cortes dedicado à emergência trouxe maior velocidade e qualidade aos exames. Estes citam ainda a simultaneidade das reconstruções permitidas pelo alto poder computacional do TC como agente do aumento da produtividade. Esse trabalho mostra a importância médica da diminuição dos tempos de exame e a corrobora com a importância dada a este aspecto dos aparelhos de TC.

AHLERT *et al.* (2009) estudaram o funcionamento do setor de diagnóstico por imagem de um hospital que realizava aproximadamente 2700 exames/mês. O trabalho focou no funcionamento dos 2 TCs, com capacidades iguais, e das 2 RMs, uma simples e limitada e outra mais poderosa. Os autores estudaram os tempos parciais e totais gastos pelos pacientes no processo destes exames. Antes da simulação, a opção considerada para aumento de produtividade era a troca do equipamento de RM mais limitado por um novo com capacidade igual à do outro aparelho. A simulação testou essa possibilidade. O fluxo dos pacientes era: chegada à unidade após marcar o exame, retirada da senha e espera do chamado. Um atendente chamava o paciente para se cadastrar e ingressar para realização do exame. Nesse momento, o paciente se deslocava até a recepção, onde aguardava a entrevista. Após essa, o paciente esperava na “Sala de Observação”, onde o mesmo poderia ser preparado para o exame. Quando um equipamento estivesse liberado, o paciente era chamado para a realização do exame. Após ser posicionado no equipamento por um técnico de enfermagem, o exame era efetuado. Terminado o exame, o paciente era retirado do equipamento, se este estivesse com acesso venoso, o mesmo seria retirado e o paciente liberado. Os tempos medidos foram: da chegada do paciente até finalização do ingresso; da chegada do paciente ao centro de imagem até chamada para entrevista; tempo de entrevista e da duração do exame. Inicialmente, acreditavam que a fase de entrevistas seria relevante, o que não se confirmou. Os autores consideraram mais significativos os tempos da chegada até o ingresso (em média 15’32”), de espera da Sala de Observação (em média 20’57”) e o de realização do exame (em média 23’17”). A média dos tempos totais entre os procedimentos de RM e TC foi de 57’37”. Ao separarem por tipos de exame, os de TC levavam em média de 45’38” e os de RM 72’29”, da chegada do paciente ao hospital até o fim do exame. Os autores consideraram que o fato de uma das RM possuir limitações criou um “gargalo” no sistema, pois, muitos dos exames não podiam ser executados nela. Doze cenários foram simulados: Original; Troca do equipamento de RM limitado por modelo semelhante ao outro equipamento; Demanda

disciplinada; Recepção dedicada; Mais um equipamento de RM; Acabar com os encaixes; Todos com e sem desistências dos pacientes.

Foram simuladas 120 replicações de cada cenário, sendo que cada uma se referia a uma semana. Os resultados foram:

1. Troca do aparelho de RM limitado por um igual ao outro aparelho: pequeno aumento na capacidade de exames, com impacto na diminuição do tempo de atendimento nos exames de RM;
2. Demanda disciplinada: sem ganho de produtividade;
3. Recepção dedicada para TC e RM: sem ganho de produtividade;
4. Compra de mais um aparelho de RM: grande impacto no tempo de atendimento, porém esta é uma alternativa muito cara;
5. Eliminação dos encaixes: diminuição dos tempos de atendimento tanto para TC, quanto para RM.

Os autores concluíram que a melhor opção seria a troca do aparelho de RM mais simples por outro mais poderoso e que deveriam rever o atendimento à pacientes não agendados. Esses ressaltaram a aplicabilidade da simulação na área da saúde. Com os resultados apresentados, pôde-se observar o quanto o método pode ser útil na seleção entre intervenções dos mais diversos tipos em ambientes médico-hospitalares.

SANTOS *et al.* (2012) estudaram o fluxo de pacientes no setor de Medicina Nuclear, mais precisamente nos exames de PET/CT do HC1 do Instituto Nacional do Câncer. Para tal, foi criado um modelo do processo de obtenção de tal exame, desde a entrada do paciente no setor até a sua saída do mesmo. O processo de exame foi dividido em nove etapas: “entrevista”, “sala de espera”, “preparo”, “espera de injeção”, “injeção”, “efeito isótopo”, “WC”, “espera” e “exame”. Para a criação do modelo foram criados 9 locais, pois o movimento do paciente no setor também foi modelado. Assim, algumas etapas foram agrupadas como, por exemplo, a estação “repouso” que agrupou “preparo”, “espera de injeção”, “injeção” e “efeito isótopo”. Por outro lado, foram criadas as estações “entrada”, “recepção” e “saída” que representaram, como dito, a movimentação do paciente dentro do setor. No modelo inicial, a estação “repouso” possuía capacidade para 2 pacientes, enquanto as outras estações somente possuíam capacidade para 1. Os tempos utilizados foram retirados de SANTOS *et al.* (2010). Os tempos mínimos, médios e máximos de cada etapa foram utilizados na configuração 1, 2 e 3, respectivamente. A partir de tal modelo as 3 configurações foram simuladas no pacote MedModel<sup>®</sup> do

*software* ProModel<sup>®</sup>. Para a simulação foi considerada a entrada de um paciente a cada 30 minutos a partir das 11:00h e o período de funcionamento do setor de 8 horas diárias. A simulação inicial mostrou que a capacidade unitária da estação “WC” representava um “gargalo” no processo. Nas condições iniciais, no período de trabalho de 8 horas, poder-se-ia fazer 8, 4 ou 2 exames nas configurações 1, 2 e 3, respectivamente. Para as 3 configurações foram simulados aumento de capacidade de todas as estações, porém, somente as alterações nas estações “WC”, “repouso” e “exame” produziriam resultados expressivos. Os autores não consideraram razoável a aquisição de outro aparelho devido ao alto custo deste e pequeno impacto na produtividade sugerido pela simulação. Com a adição de 2 boxes de repouso e de mais 2 banheiros (WCs), a simulação apontou um aumento de produtividade. Nestas condições, no período de trabalho de 8 horas, poder-se-ia passar a fazer 11, 8 ou 3 exames nas configurações um, dois e três, respectivamente. Assim, a partir dos resultados das simulações e pelos custos relativamente baixos, os autores consideraram que estas seriam as alterações mais interessantes para obter-se uma maior produtividade do setor. Os autores concluíram que o método se mostrou eficiente e que poderia ser utilizado no planejamento de futuras alterações, corroborando o encontrado em outros trabalhos, que mostram a capacidade da SED em auxiliar na gestão de serviços de saúde como um todo. Ficou claro, mais uma vez, que o método pode ser aplicado nos mais diversos setores hospitalares, obtendo resultados expressivos na racionalização dos recursos empregados.

LIN *et al.* (2015) estudaram a otimização dos processos de um centro cirúrgico de 8 salas utilizando o *software* ProModel<sup>®</sup>. Os autores relataram um aumento de 88 pacientes atendidos para 103, porém, o trabalho não cita quais as diferenças entre os cenários simulados. Os autores ressaltaram a validade do método de simulação para a otimização dos processos.

KOVALCHUK *et al.* (2017) aplicaram teoria de filas e simulação por eventos discretos ao estudo do fluxo de pacientes com Síndrome Coronariana Aguda (SCA), utilizando o *software* Python com os módulos SimPy (módulo de simulação por eventos discretos) e SciPy (módulo de computação científica). Para a criação do modelo foram analisados os processos, 3434 prontuários eletrônicos (referentes a pacientes com SCA) e utilizados dados e textos dos atendimentos. Os pacientes foram classificados em 13 grupos a partir de uma análise de clusters. Três grandes clusters agruparam 58% dos pacientes e a partir da análise do fluxo dos pacientes nestes clusters, foram determinados os fluxos mais comuns. Os autores concluíram que usar a simulação combinada com a



classificação dos pacientes produziu resultados mais realistas e que modelos de fluxo mais precisos facilitam o ajuste para pacientes com permanência maior que 20 dias.

ZHANG *et al.* (2011) estudaram o processo de exames de ressonância magnética em um hospital acadêmico alemão de 1200 leitos. Inicialmente, a unidade possuía somente um aparelho, porém, durante o estudo, instalou mais um e a produtividade não dobrou. Foram estudadas razões dos atrasos nos atendimentos e, para cada causa foi implantada uma ação corretora. O objetivo do trabalho foi aumentar a parcela de pacientes atendidos em até 24 horas. Após as alterações, a produtividade dos aparelhos aumentou em 32% e o número de atendimentos mensais aumentou em 38%. O número de paciente atendidos em até 24 horas aumento de 56% para mais de 90%.

BAHADORI *et al.* (2017) estudaram a produtividade de um setor de RM em um hospital militar iraniano de 700 leitos. A fim de obter-se maior produtividade do setor, foi criado e simulado um modelo baseado no funcionamento desse setor utilizando o *software* Arena<sup>®</sup>. Foram considerados “recursos” do modelo, as recepcionistas, o equipamento, o operador e os profissionais envolvidos na preparação do paciente. Os pacientes eram as “entidades”. O processo de obtenção do exame foi dividido em 5 etapas. Foram criados e simulados quatro cenários, com redução de uma recepcionista pela manhã; com o aumento de 1 hora no turno diário de funcionamento do setor; com a redução da recepcionista e aumento do turno e, finalmente; com a aquisição de mais um aparelho de RM e contratação de mais um operador. Os resultados mostraram que, somente com o aumento do turno diário poder-se-ia aumentar de 78 para 83 o número de exames diários e diminuir de 56 para 48 dias o tempo até o exame. Porém, como esperado, o maior aumento da produtividade ocorreu no cenário 4 com a aquisição de uma RM nova e contratação de mais um operador. Nesse cenário, poderiam ser realizados 104 exames por dia e o tempo até o exame seria reduzido a zero dias. Os custos de implantação de cada cenário não foram estudados.

A partir desta pesquisa bibliográfica, confirmou-se que o estudo do fluxo de pacientes e dos processos hospitalares são importantes para a gestão desses, como visto nos trabalhos de SANTOS *et al.* (2010) e BOLAND *et al.* (2008). A pesquisa mostrou ainda que os métodos de simulação computacional, como a SED, utilizados nos trabalhos de SENDI *et al.* (2004), FERREIRA *et al.* (2004), STROPARO *et al.* (2004), SANTOS *et al.* (2012) e AHLERT *et al.* (2009), são ferramentas poderosas na procura por soluções que propiciem aumento da produtividade dos mais diversos setores.

### 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão abordados os aspectos teóricos necessários à execução do estudo. Este foi dividido em duas grandes seções, Simulação e Tomografia computadorizada.

#### 3.1. Simulação

Para a compreensão dos processos de otimização/simulação, alguns conceitos básicos precisam ser definidos:

##### **Sistema**

Um sistema pode ser definido como sendo uma combinação de componentes que operam em conjunto no desempenho de uma função que seria impossível para qualquer das partes separadamente (OGATA, 1998 apud SOARES, 2018). BANKS (2001) define como sendo um grupo de objetos reunidos com alguma interação e interdependência para obter algum resultado. Esse conceito pode ser expandido, pois é possível criar submodelos que componham um modelo maior representando o sistema completo. HARREL *et al.* (2002) definem sistema como sendo um conjunto de entidades, como: equipamentos, pessoas, etc., que trabalham em conjunto para a obtenção de um objetivo. Um sistema sempre sofre influência do meio de sua inserção.

##### **Processo**

Conjunto de operações e/ou transformações realizadas sobre um ou mais materiais, com a finalidade de variar pelo menos uma de suas propriedades físicas ou químicas (PEREIRA, 2000). Essa definição pode ser estendida para a execução de tarefas que envolvam etapas distintas com o objetivo da obtenção de um resultado final. Por exemplo, o conjunto de etapas necessárias para a produção de um produto pode ser entendido como o “processo de construção de tal produto”, e o conjunto de etapas necessárias para a execução de um exame diagnóstico seria o “processo de execução de tal exame”.

##### **Estado do Sistema**

Segundo HARREL *et al.* (2002) é o conjunto de variáveis que descrevem as condições de um sistema em um determinado instante. Por exemplo, o número de pessoas em uma determinada fila após um determinado tempo.

## Modelo

Para BANKS (2001), pode ser definido como a representação de um sistema com o propósito de estudá-lo. Este é uma representação de uma parte da realidade que permite a compreensão, mudanças, controle ou administração dessa realidade. CHWIF e MEDINA (2015) afirmam que um modelo é uma representação abstrata de um sistema. Os modelos representam, de forma simplificada, os componentes mais importantes dos sistemas e a sua interação. Assim, somente os itens realmente necessários devem ser incluídos nos modelos de maneira que a essência do sistema seja captada, logo, itens não relevantes devem ser descartados. Os modelos podem ser utilizados como base para análise, entendimento, exploração e experimentação da realidade, com a implantação de cenários alternativos e em função de ações diversas (INGALLS, 2002). Os modelos podem ser usados como ferramentas para a análise de cenários e para tomadas de decisão. CHWIF e MEDINA (2015) classificam os modelos quanto à:

- **Forma:**
  - **Icônicos:** utilizam ícones, objetos (maquetes) ou figuras para o sistema;
  - **Analógicos:** utilizam a analogia com sistemas de natureza diversa que sejam mais simples de manipular;
  - **Simbólicos:** utilizam operadores simbólicos e/ou variáveis que produzam sentenças lógico-aritméticas descritivas de um sistema.
  
- **Finalidade:**
  - **Conceituais ou Qualitativos:** são os iniciais, normalmente possuem desenhos e textos, a fim de definir as variáveis relevantes e esboçar as relações sistêmicas, constituindo a base para a construção de modelos simbólicos ou analógicos;
  - **Explicativos:** contêm as variáveis de controle que retratam o funcionamento do sistema;
  - **Descritivos:** não possuem variáveis de controle, assim apenas descrevem o funcionamento do sistema sem explicá-lo, pois não podem interferir no comportamento.

- **Dinâmica (comportamento temporal):**

- **Contínuos:** modelos nos quais o tempo transcorre continuamente, logo, as variáveis podem variar continuamente no tempo. Assim, é possível determinar o estado do sistema a cada fração de tempo;
- **Discretos:** modelos nos quais o tempo não transcorre continuamente, mas em intervalos, assim o estado do sistema só pode ser conhecido em momentos específicos;
- **Determinísticos:** modelos nos quais o estado das variáveis de saída e/ou os resultados são função, unicamente, das condições do experimento, dos estados de entrada e dos estados anteriores das mesmas, sem a presença de componentes aleatórios. Logo, o estado do sistema modelado, num instante determinado, define o estado do sistema no momento subsequente;
- **Probabilísticos, Estocásticos ou Não Determinísticos:** modelos nos quais pelo menos uma variável não é função exclusiva do estado anterior do sistema por sofrer alguma influência aleatória.

## Otimização

Normalmente, os problemas de otimização utilizam-se de funções objetivos as quais se pretende maximizar ou minimizar, sujeitas a restrições/limitações. As soluções possíveis para tais problemas consistem na determinação de valores ótimos para a maximização ou minimização da função, conforme o interesse. Métodos de solução incluem programação linear, busca em árvore e heurísticas em geral. Em muitos casos as técnicas não alcançam resultados ótimos, daí serem chamadas de “subotimizantes” (CHWIF e MEDINA, 2015). Abaixo é apresentado um esquema genérico de uma condição a ser otimizada, uma função objetivo a ser minimizada ou maximizada e suas restrições.

Otimizar [Maximizar ou Minimizar]:

$$Z = f(X)$$

Sujeito a:

$$AX \left\{ \begin{array}{l} \geq \\ \leq \\ = \end{array} \right\} B$$

$$X \left\{ \begin{array}{l} \geq \\ \leq \end{array} \right\} 0$$

Quanto mais complexo é um sistema (grande número de variáveis e introdução de aspectos dinâmicos, por exemplo), mais complicada se torna a sua modelagem, porém, modelos mais simples podem produzir soluções aquém das desejadas ou necessárias.

Segundo BANKS (2001), a integração de módulos de otimização com modelos de simulação se apresenta como um assunto especialmente interessante e útil. A união das ferramentas de simulação e otimização é conhecida como “*Simulation Optimization*” e consiste em utilizar valores de variáveis provenientes dos procedimentos de otimização em modelos de simulação que retornarão os valores das funções objetivo. A otimização terminará ao obter-se a satisfação de algum critério e produzirá os valores ótimos ou “subótimos” das variáveis estudadas na simulação. AZADIVAR (1992) apud CHWIF e MEDINA (2015) cita que um problema de *Simulation Optimization* é um problema de otimização em que a função objetivo e/ou as restrições só podem ser avaliadas por meio da simulação computacional.

O primeiro passo do uso da simulação para a otimização de um sistema qualquer é o projeto do mesmo. A partir disso, o sistema deverá ser modelado e simulado. Com os resultados dos cenários simulados, o projeto poderá ser alterado e os efeitos das alterações observados/monitorados. Com a análise dos efeitos, o sistema deverá ser otimizado. Após a otimização, o sistema poderá ser reprojetoado e o processo de otimização reiniciado. A Figura 1 representa o uso da simulação na otimização de um processo/projeto.

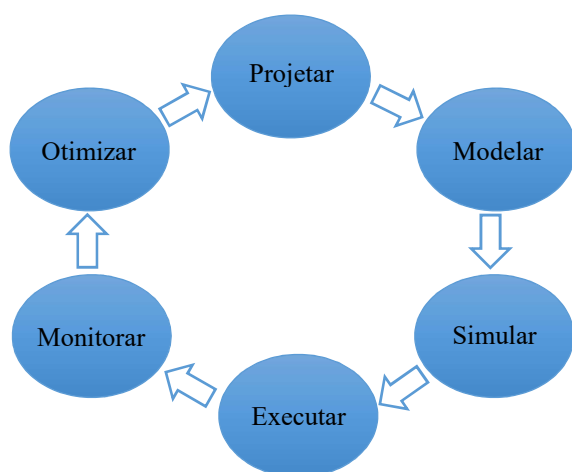


Figura 1: Esquema do uso da simulação na otimização de um projeto

## Simulação

Segundo MIYAGI (2006) e SANTOS (1999), a simulação pode ser entendida como a “imitação” de uma operação ou de um processo do mundo real, durante um período determinado. Para VACCARO (1999) apud AHLERT *et al.* (2009), a simulação consiste

na recriação de um sistema em um ambiente controlado, de modo que seja possível compreender, manipular e verificar seu comportamento de forma segura e a custos relativamente menores. Para HOUAISS (2001) apud CHWIF e MEDINA (2015), simulação pode ser a imitação do funcionamento de um processo a partir do funcionamento de outro, ou simplesmente, um ensaio, uma experiência ou um teste. Já AHLERT *et al.* (2009) definem simulação como a criação de modelos, com o objetivo de representar sistemas em um momento particular, de acordo com os objetivos do estudo, para interagir de forma indireta e simplificada com esses sistemas.

A simulação permite a criação de sistemas sofisticados que seriam de difícil implantação sem serem simulados/depurados antes de sua criação física. O desenvolvimento e a implantação de controles sofisticados de aeronaves e/ou automóveis modernos, de poderosos microprocessadores e de outros sistemas intrincados só foram possíveis por causa da diminuição da necessidade da criação de dispendiosos protótipos (NUTARO, 2011).

A simulação é também a ferramenta mais adequada para se analisar sistemas que não permitem aplicar a programação linear em virtude das variações estatísticas e das interdependências de seus elementos (FISHMAN, 2001). Modelos nos quais haja formação de diversas filas também sugerem o uso de simulação devido à complexidade que estes podem alcançar. Por outro lado, nos casos de sistemas simples que permitam soluções analíticas, a simulação se torna dispensável. SHAKOOR (2015) considera a simulação uma das mais poderosas ferramentas para análise, planejamento e decisão, nos projetos e na operação de sistemas complexos.

A simulação, por si só, não otimiza um processo, porém permite estudar ações que possam otimizá-lo, maximizando ou minimizando uma função objetivo. Assim, a simulação é uma ferramenta avaliadora e não geradora de soluções (CHWIF e MEDINA, 2015). É importante ressaltar que a simulação não prevê o futuro e que somente pode prever o comportamento de um sistema baseado nos dados de entrada, respeitando as premissas inerentes. Segundo CHWIF e MEDINA (2015), a simulação pode utilizar equações matemáticas, porém, devido à natureza aleatória das variáveis e a interatividade e interdependência das etapas dos processos simulados, normalmente, não existirão expressões que forneçam os resultados de uma simulação diretamente a partir de valores de entrada. Para haver uma simulação, é preciso a criação de um modelo que copie um sistema real e que funcione como tal, mesmo que esse ainda não tenha sido implantado.

Normalmente, os sistemas reais são muito maiores, mais complexos e onerosos que os modelos utilizados nas simulações.

## **Simulação Computacional**

Com o desenvolvimento da computação ocorrido nas últimas décadas, softwares dedicados à simulação computacional foram desenvolvidos, simplificando a criação de modelos, já que, antes destes softwares, eram necessários conhecimentos em programação para a sua implantação.

Escolher quais alterações podem resolver uma ou outra questão nem sempre é ação simples e pouco dispendiosa. Neste sentido, a simulação computacional se apresenta como uma ferramenta de baixo custo plenamente testada em ambientes como aeroportos, portos, bancos, parques de diversões e hospitais, entre outros (CHWIF e MEDINA, 2015). Com ela, é possível analisar o comportamento, suas capacidades e habilidades sem necessidade de implantação física do sistema de interesse, viabilizando testes como os efeitos de ataques terroristas ou desastres naturais, por exemplo. MIYAGI (2006) destaca a aplicabilidade da simulação computacional nas áreas que envolvam recursos naturais, de manufatura, da saúde, de transportes, da construção civil, restaurantes, computacionais, na reengenharia e processos de negócios, no processamento de alimentos e até mesmo na área de jogos e/ou entretenimento.

A criação de um modelo de um sistema ainda não implantado fisicamente permite inferir sobre pontos de operação ideais e/ou críticos. Pode-se, por exemplo, estudar a capacidade de atendimento de um serviço de saúde para determinar a política de agendamento mais próxima do ideal, antes da construção da unidade. Caso a capacidade de atendimento esteja fora dos limites de interesse, alterações nas características podem ser simuladas a fim de se alcançar os resultados esperados. A simulação pode indicar se alterações nos sistemas/processos diminuiriam os tempos de atendimentos/espera ou aumentariam a produtividade de serviços médicos diversos (SANTOS *et al.*, 2012, VAN LENT *et al.*, 2012, SHAKOOR, 2015 e SANTOS *et al.*, 2019).

Um modelo computacional nunca irá representar totalmente a realidade devido principalmente às simplificações na sua construção. Assim, quando da criação deste, é necessário o conhecimento de seus limites e aplicações. O modelo deve incluir os aspectos mais relevantes do sistema modelado e a supressão ou adição de novas informações e/ou variáveis deverá ocorrer durante a etapa de validação do modelo. Notadamente, informações e/ou variáveis desnecessárias ou que compliquem demais o

modelo sem melhoria nos resultados deverão ser descartadas; informações e/ou variáveis que tornem o modelo mais próximo da realidade sem inviabilizá-lo computacionalmente, devem ser adicionadas. Essas são decisões que se relacionam com a habilidade e conhecimento do projetista, e com a maturidade do modelo.

O mecanismo de simulação produz um comportamento dinâmico a partir de um conjunto de componentes. Como em qualquer estudo, a obtenção dos dados e a qualidade destes sempre será preponderante para a qualidade do resultado. Comumente, quando da criação de um modelo, pode-se necessitar de dados inexistentes ou pouco disponíveis, nessa situação deve-se priorizar o menor impacto possível na qualidade final do modelo. Para que a simulação produza benefícios, os modelos precisam obter o melhor compromisso possível entre a reprodução da realidade e a simplicidade. O processo de criação de um modelo de simulação, normalmente, transcorre de uma maneira evolutiva, partindo-se de modelos mais simples para mais complexos conforme o modelo se desenvolve. A simulação pode levar ao diagnóstico de problemas e demonstrar/explicar interações entre variáveis em sistemas complexos. MIYAGI (2006) apresenta como principais motivos do uso da simulação computacional:

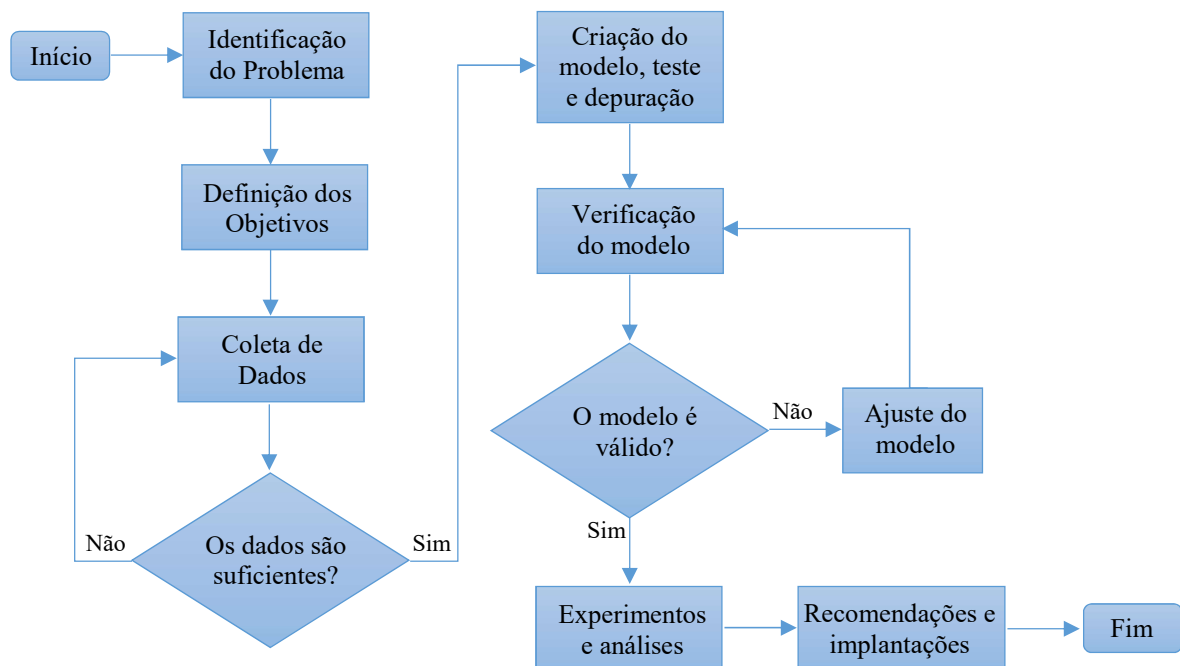
- Possibilidade de controlar fontes de variações dos sistemas;
- Possibilidade de controlar o nível de detalhamento de um projeto/modelo;
- Possibilidade de replicar o modelo;
- Possibilidade de parar, rever e reiniciar processos;
- Possibilidade de restaurar estados dos sistemas;
- Possibilidade de controlar o tempo, expandindo e comprimindo o mesmo.

Antes da introdução dos *softwares* de simulação computacional, usar computadores para a simulação de um processo ou sistema somente era possível com o uso de linguagens de programação. Isso dificultava a modelagem/simulação tendo em vista a necessidade de conhecimento destas linguagens e o tempo necessário para o desenvolvimento do código fonte. Assim, a simulação computacional somente era utilizada quando todas as técnicas de análise de sistema haviam falhado. Porém, a disseminação dos *softwares* de simulação tornou a tarefa de modelar/simulação sistemas/processos muito mais simples e rápida. SAKURADA e MIYAKE (2009) consideram como vantagens dos *softwares* de simulação a possibilidade de criação de modelos para os mais diferentes sistemas, o fato de requererem tempo relativamente menor para a criação de modelos e a facilidade na utilização. Porém, consideram



desvantagens, a necessidade de conhecimento específico da operação dos simuladores e a menor flexibilidade destes. A escolha deste *software* se relacionará com o tipo de simulação, o conhecimento do projetista, disponibilidade e aplicabilidade. Existem simuladores dedicados a ambientes específicos como os médicos/hospitalares, industriais e portuários, por exemplo. Os *softwares*/pacotes normalmente oferecem ferramentas de análises estatísticas e recursos de animação dos processos. Na literatura, podem-se encontrar diversos trabalhos que avaliam tipos diferentes de simuladores, como TEWOLDEBERHAN *et al.* (2002) e CARDOSO e JÚNIOR (2016), por exemplo.

Basicamente, um processo de modelagem/simulação se inicia com a identificação do problema ou processo e a definição dos objetivos. Então, os dados deverão ser coletados até que sejam suficientes para a simulação, quando o modelo poderá ser criado, testado e, se necessário, depurado. A partir dos primeiros resultados das simulações, deve-se verificar a validade dos mesmos; se forem considerados válidos, passa-se à próxima etapa, caso contrário, o modelo deve ser ajustado e novamente validado. Uma vez validado o modelo, as simulações deverão ser feitas utilizando-se as variáveis e os cenários escolhidos. Os resultados deverão ser analisados e a partir destes, as possíveis recomendações e implantações no sistema real, executadas. Na literatura, encontram-se vários fluxogramas para o processo de modelagem/simulação, como em CENTENO e CARRILO, 2001 ou HARREL *et al.*, 2002. A Figura 2 apresenta um fluxograma adaptado a este trabalho, onde observa-se a sequência de etapas descritas acima.



**Figura 2:** Fluxograma de modelagem e simulação de um processo\*  
 \*adaptado de CENTENO e CARRILO, 2001 apud COELLI, 2008.

Assim como os modelos, a simulação pode ser contínua ou discreta. Na simulação contínua os estados das variáveis e do sistema mudam continuamente no tempo. Esta pode utilizar equações e/ou modelos físicos que, como todo processo de simulação, descrevem somente os itens mais importantes do sistema.

Na simulação de eventos discretos, as mudanças de estado ocorrem em instantes discretos, assim, os estados das variáveis e do sistema não se alteram a qualquer momento, somente em momentos determinados. A operação do sistema é representada como uma sequência cronológica de eventos. Os eventos ocorrem em instantes de tempo que marcam as mudanças de estados do sistema. NUTARO (2011) cita que uma simulação de eventos discretos executa eventos programados por seus componentes na ordem dos tempos de cada evento. A simulação discreta ainda se divide em incrementos de tempos constantes e de tempos variáveis.

PIDD (1998) *apud* AHLERT *et al.* (2009) cita ainda a possibilidade de um tipo híbrido de simulação contendo elementos discretos e contínuos.

Devido às características das variáveis encontradas nos processos de exame de tomografia computadorizada, a simulação por eventos discretos (SED) foi a escolhida para este estudo.

COELLI (2008) destaca os principais elementos de uma simulação computacional discreta:

- **Rotina Principal:** Programa central, que controlará a simulação e acionará possíveis sub-rotinas;
- **Rotina de Inicialização:** Definição dos estados iniciais de variáveis, atributos, locais e etc. Permite o início da simulação. Os valores iniciais podem ser preestabelecidos e/ou alterados/inseridos pelo usuário no início de cada simulação. Podem também ser alterados permitindo a criação de novos cenários. Pode-se inserir na rotina de inicialização um “*warm-up*” ou “aquecimento” para diminuir o efeito da pseudo-aleatoriedade dos valores gerados;
- **Rotina do Evento  $E_i$ :** Atualizam o estado do sistema na ocorrência de um evento particular;
- **Rotina de Avanço do Tempo:** Define o intervalo do tempo discreto, isto é, determina o instante do próximo evento e avança o tempo simulado para a ocorrência deste;

- **Biblioteca de Funções:** Conjunto de rotinas/sub-rotinas utilizadas, principalmente, para a geração de número aleatórios, de acordo com as distribuições de probabilidade utilizadas em cada modelo;
- **Gerador de Relatórios:** aplicação computacional que produz cálculos e relatórios pré-determinados, parciais ou finais, a partir de estatísticas pré-definidas, conforme o interesse do usuário.

Basicamente, o processo de simulação por eventos discretos consiste das seguintes etapas:

- **Inicialização:** as diversas variáveis, os contadores e o “relógio” do sistema recebem seus valores iniciais (via software e/ou usuário); e são determinados os instantes dos eventos subsequentes;
- **Incremento temporal:** o tempo da simulação avança até a ocorrência do próximo evento; o evento é processado e o estado do sistema atualizado; contadores e variáveis são atualizados; e é determinada a ocorrência dos próximos eventos.
- **Término da Simulação:** os valores dos contadores e das diversas variáveis são armazenados para análise.
- **Repetição da Simulação:** deverão ser feitas diversas repetições (ou replicações) para minimizar os efeitos do regime transitório inicial decorrente da pseudo-aleatoriedade dos números gerados. Esses efeitos também podem ser eliminados com o uso de longos tempos de simulação (CHWIF e MEDINA, 2015).

Os elementos principais de uma simulação computacional são:

- **Entidades:** Elementos que sofrerão o processo. Podem receber atributos a serem testados para a tomada de decisão ou para obterem-se estatísticas específicas.
- **Recursos:** Elementos que executarão o processo. Podem ser pessoas, ferramentas, veículos ou qualquer outro objeto que possa ser usado para transportar materiais entre dois locais, realizar uma operação sobre um material em um local, fazer algum procedimento médico, ou realizar manutenção em um local ou em outro recurso que esteja inoperante, por exemplo. Recursos podem ser dinâmicos ou estáticos. O que distingue estes

dois tipos de recursos é o fato de o primeiro ser vinculado a uma rota e o segundo, não. Características de movimentação dos recursos, como velocidades quando cheio e quando vazio, aceleração, desaceleração, tempo de carga e descarga, entre outros, podem ser especificadas.

- **Locais:** Lugar físico (fictício) onde as etapas do processo ocorrerão. Lugar imóvel de processamento ou armazenamento num sistema, para o qual entidades são movidas para serem armazenadas, processadas ou tomar novo roteiro. Os locais podem ser simples (comportam apenas uma entidade de cada vez) ou múltiplos (comportam mais de uma entidade simultaneamente). Os locais podem possuir regras de entrada e saída: as regras de entrada são usadas para seleccionar qual a próxima entidade a ser manipulada caso exista mais de uma destas com essa possibilidade, ao passo que as de saída são usadas num local de capacidade múltipla para determinar a ordem com que deixarão o mesmo.
- **Rotas:** Por onde as entidades e os recursos se movem. Elementos opcionais que definem o caminho utilizado por entidades e recursos para se moverem no sistema. Várias rotas podem ser definidas, e várias entidades e/ou recursos podem compartilhar a mesma rota. Os movimentos de entidades e recursos ao longo da rota podem ser definidos em termos de comprimento da mesma e velocidade de movimento, ou simplesmente pelo tempo para percorrer a mesma.
- **Processos:** Lógica que define qual a operação e o roteamento para cada tipo de entidade em cada local do sistema. Os tempos de operação ou serviço, requisições de recursos, lógicas de processamento, relações de entrada e saída, condições de roteamento e tempos de movimentação podem ser descritos. Os tempos de operação podem ser descritos por constantes, distribuições probabilísticas, resultados de funções, valores de atributos ou uma combinação destas formas.
- **Chegadas:** Neste elemento são definidos os momentos em que uma entidade entra no sistema. Um registro de chegada é composto de: número de novas entidades por chegada, frequência das chegadas, locais das chegadas, o instante da primeira chegada e o número total de ocorrências de chegadas. Chegadas podem ser determinísticas, condicionais ou estocásticas.

- **Horários de funcionamento (turnos):** Determina horários de funcionamento e paradas agendadas do sistema, e é definido pela seleção de horas no dia e dias na semana. A cada horário de trabalho podem ser associados recursos e locais.
- **Atributos:** Podem-se definir atributos para as entidades e os locais que, podem assumir tanto valores inteiros quanto reais. Os atributos são geralmente empregados para representar características das entidades tais como cor, tipo de paciente, número de vezes que foi retrabalhada e tempo de operação da entidade para locais específicos. Tanto para variáveis como para atributos, é possível incrementar, decrementar ou executar qualquer operação matemática, com a diferença de que os atributos estão associados a entidades e locais específicos.
- **Variáveis:** são usadas para tomadas de decisão e cálculo de estatísticas. O valor da variável pode ser monitorado e mostrado ao fim da simulação em forma de tabela, gráfico ou histograma. Podem assumir valores reais ou inteiros.

## 3.2. Tomografia Computadorizada

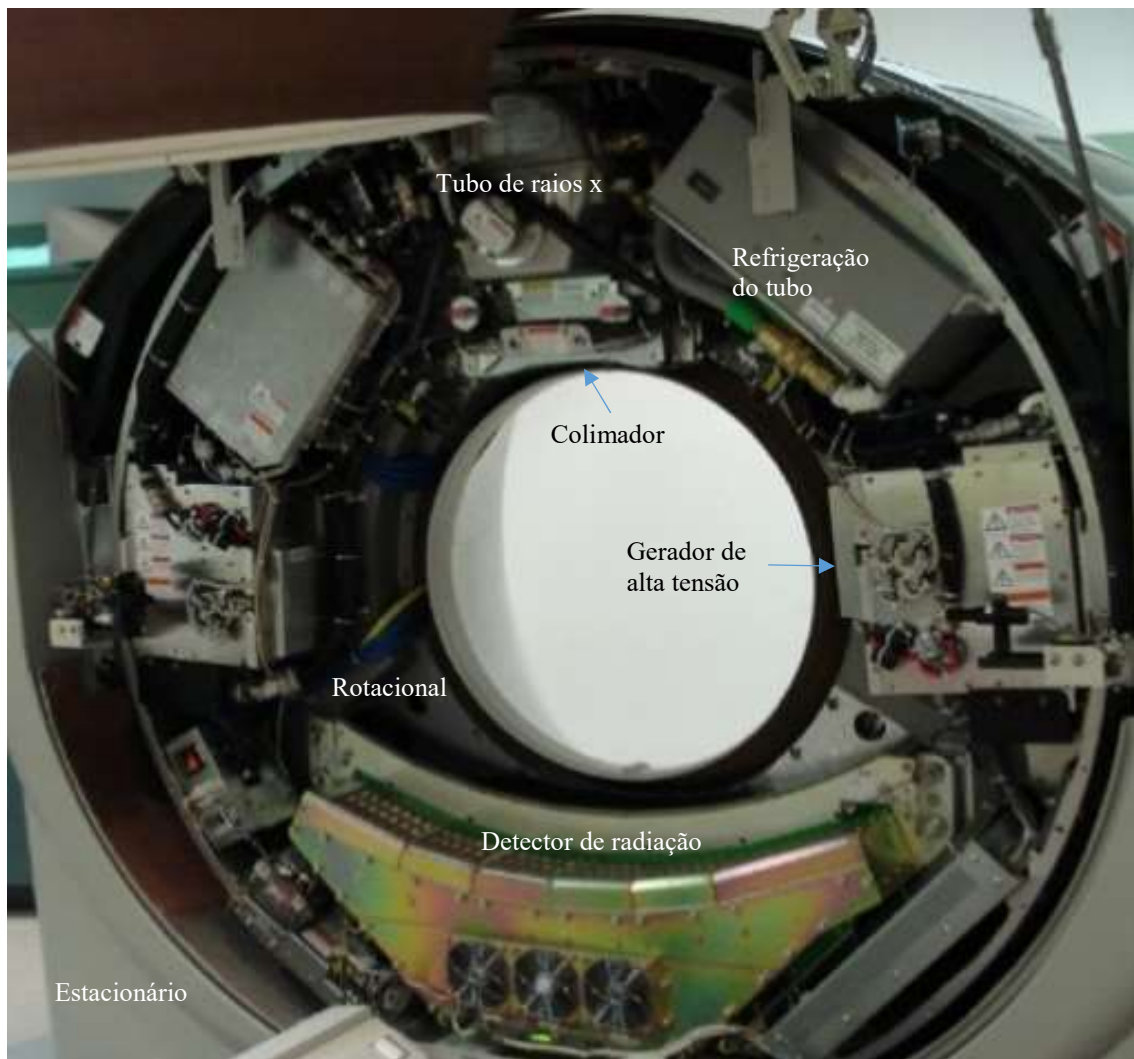
### Tomógrafos Computadorizados

Os TC são equipamentos radiológicos que produzem imagens seccionais a partir das projeções resultantes da aplicação de um feixe de raios x em torno da área examinada. Os raios x são produzidos em uma válvula eletrônica, normalmente chamada de “ampola” ou “tubo de raios x”, estes raios são conformados ou delimitados em um dispositivo chamado de colimador que determinará o tamanho da área longitudinal a ser irradiada, definindo inclusive a espessura do “corte” produzido. Os fótons de raios x atravessam (ou não) o corpo a ser examinado e alcançam o detector de radiação localizado em oposição ao tubo de raios x. Estas peças ficam posicionadas dentro de uma outra grande peça chamada de “*Gantry*” ou portal e, nos aparelhos helicoidais, giram continuamente em volta da área de exame (JIANG, 2009; CIERNIAK, 2011). A Figura 3 apresenta um sistema de TC.



**Figura 3:** Equipamento de TC, Gantry, Mesa de Exames e Console de Comando (TOSHIBA, 2016)

O *Gantry* é uma peça grande com uma passagem no centro por onde o objeto a ser examinado passará e será irradiado. Este pode ser dividido em 2 partes, estacionária (que não gira) e a rotacional que gira e é responsável pela geração da imagem. Na parte rotacional, além do tubo, colimador e detector de radiação, estão posicionados o gerador de alta tensão e seus sistemas de controle, o sistema de aquisição de dados (*DAS*) composto pelas placas de integração, conversão e serialização dos dados adquiridos pelo detector e os sistemas de comunicação entre as 2 partes do *Gantry*. A maior parte da diferenciação entre as tecnologias de número de cortes diversos se encontra no *DAS*, em que o detector terá tantas linhas de sensores quantos forem os cortes simultâneos que o aparelho for capaz de produzir. Essas linhas são posicionadas paralelamente no eixo “z”, isto é, no sentido da profundidade do gantry ou mesmo ao longo do corpo. Logo, um tomógrafo de 1 corte possuirá uma linha de detectores, serão 16 linhas nos TCs de 16 cortes e 320 nos de 320 cortes, por exemplo. Na parte estacionária, se encontram os sistemas de controle dos movimentos de rotação e inclinação do *Gantry*, dos movimentos da mesa de exames, do colimador, interfaces de comunicação com o console e com a parte rotacional. A comunicação entre as 2 partes do *Gantry* pode ser através de radiofrequência (RF), ótico ou ainda através do sistema de escovas (*slip-ring*). A alimentação é transmitida para a parte rotacional por escovas (JIANG, 2009; CIERNIAK, 2011). Na Figura 4 pode-se observar o interior de um *Gantry* de um TC.



**Figura 4:** Interior de um Gantry de um TC

A mesa de exames é o local onde o objeto a ser examinado é posicionado. Esta se move vertical (posicionamento) e longitudinalmente (posicionamento e exame). Nela estão os sistemas de movimento do tampo da mesa, com seus motores e sensores. Este tampo é feito de fibra de carbono, um material transparente às radiações ionizantes, resistente e leve. Nos equipamentos “sequenciais”, a aquisição é feita com a mesa parada, enquanto nos helicoidais essa se move durante a emissão da radiação e a captação da radiação transpassante. Quanto mais cortes simultâneos o TC é capaz de executar, mais veloz deverá ser o movimento longitudinal da mesa (JIANG, 2009; CIERNIAK, 2011).

O console ou comando da TC é onde o operador controlará todo o processo, determinando as técnicas de exames a serem utilizadas. No console estão os computadores, discos rígidos e placas dedicadas à reconstrução de imagens. Estes consoles, normalmente, possuem muitos discos rígidos devido à diversidade de dados

armazenados. Existem discos de *software*, responsáveis pelo armazenamento dos programas necessários ao funcionamento dos sistemas; discos de imagens, responsáveis pelo armazenamento das imagens após as devidas reconstruções e discos de Raw Data, responsáveis pelo armazenamento dos dados brutos, ainda não “trabalhados” ou “reconstruídos”, provenientes do sistema de aquisição de dados no *Gantry*. Quanto mais dados o console recebe para processamento e armazenamento (condição resultante do aumento de cortes simultâneos), mais poderosos deverão ser esse computadores, discos rígidos e sistemas de reconstrução de imagem (JIANG, 2009; CIERNIAK, 2011).

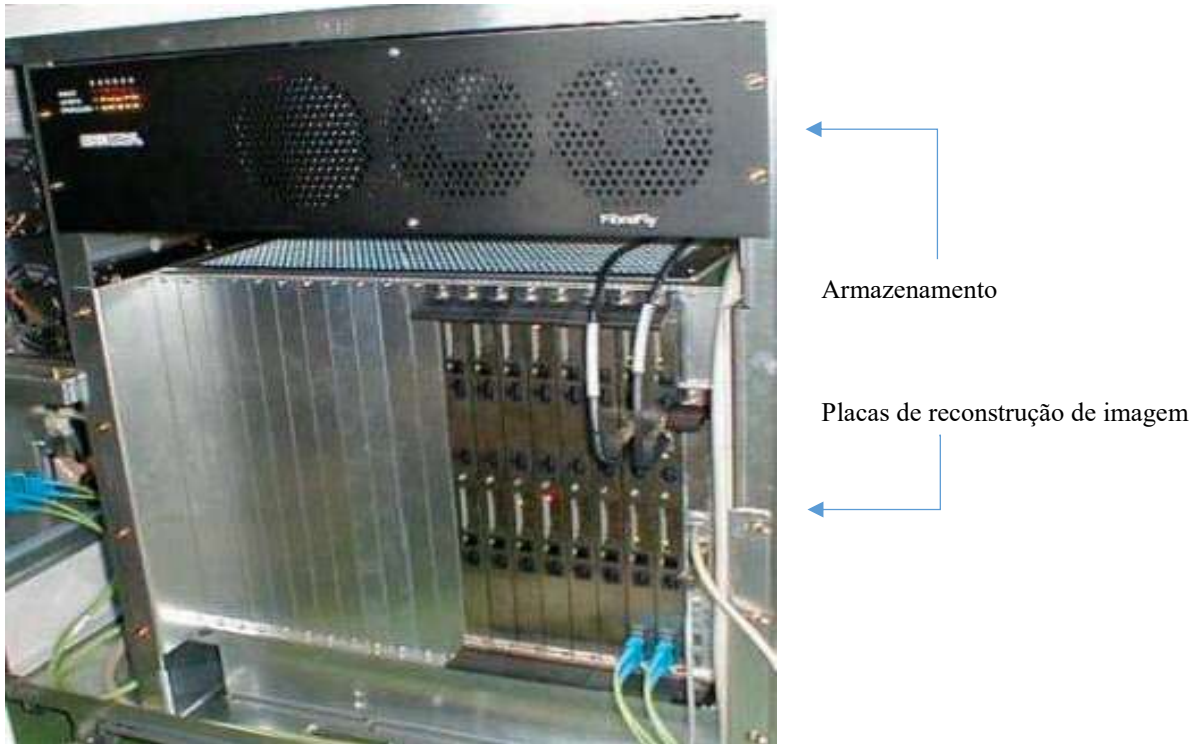
A Figura 5 apresenta o interior de um console, mais precisamente a parte computacional. A Figura 6 mostra parte do sistema de reconstrução de imagens. No caso, o aparelho em questão possui “2 consoles”.



←  
Computadores,  
Discos de sistema

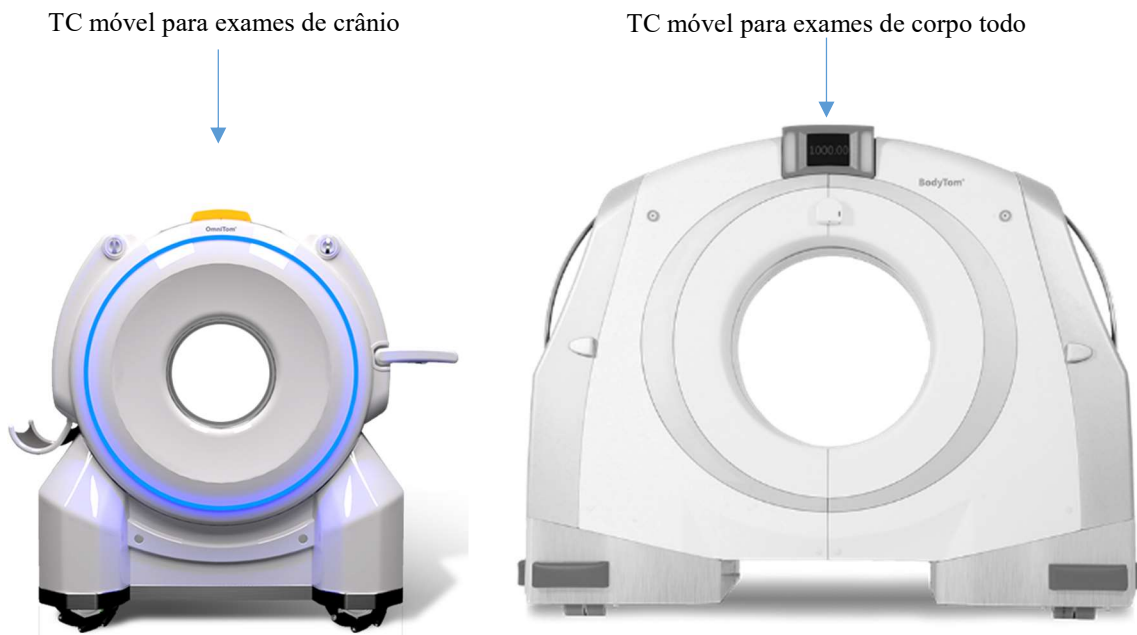
**Figura 5:** Interior de um console de um TC (parte computacional).





**Figura 6:** Interior de um console de um TC (seção de reconstrução de imagem).

Normalmente, os TC são fixos em uma sala, porém, existem modelos especiais que possuem mobilidade. Estes são utilizados em eventos esportivos, unidades militares de campanha, ou simplesmente se movem dentro da unidade hospitalar, permitindo a execução de exames durante cirurgias ou em unidades de tratamento intensivo. Este estudo não abrange tais modelos, porém a Figura 7 traz fotos de dois modelos.



**Figura 7:** Dois tipos de TCs móveis (SAMSUNG, 2018)

## Os Exames de Tomografia Computadorizada

O processo de obtenção de um exame de tomografia começa na determinação de sua necessidade por parte de um médico, seja este clínico geral ou especialista. Se o paciente estiver em uma unidade equipada com tal equipamento, este deverá se dirigir ao setor de radiologia para a execução do exame ou agendamento do mesmo. Caso seja possível a execução no mesmo dia, o paciente deverá aguardar a disponibilidade do aparelho, responder a um questionário, trocar de roupa, ser posicionado na mesa de exames do aparelho e finalmente começará a primeira fase do exame. Caso não seja necessária a aquisição de fases com meios de contraste, o paciente será retirado da mesa de exames, vestido e liberado. Caso seja necessária a aplicação de meio de contraste para outras fases do exame e o paciente estiver com o estômago cheio, este deverá aguardar o tempo necessário para o esvaziamento do mesmo. Então, a enfermagem instalará um acesso venoso e injetará tal fármaco. Após isso, nova fase de aquisição de imagem será feita. Em alguns exames, como o de abdome total, poderão ser feitas ainda mais duas aquisições, as fases de excreção renal do meio de contraste e a chamada de tardia, após essa excreção. Após este processo, o acesso venoso pode ser retirado. O paciente se vestirá e estará liberado. Normalmente, somente nos exames de emergências algum diagnóstico é dado imediatamente, nos outros casos, o resultado costuma demorar mais, dependendo da metodologia utilizada pela unidade, assim o paciente deverá aguardar o prazo determinado para receber o resultado. Por parte do operador do aparelho, o processo começa com o cadastro do paciente no software do mesmo, daí é escolhido o protocolo de exame em função da indicação clínica. O exame começa com uma ou duas exposições planas chamadas de “escanograma”, que permitem a marcação das partes anatômicas a serem analisadas e a programação do exame. Em alguns protocolos, é feita uma aquisição para o melhor posicionamento da área examinada, em outros, a aquisição começa, e esta poderá ser uma série axial sequencial ou um ou mais blocos volumétricos helicoidais (JIANG, 2009).

Muitos são os parâmetros ajustáveis para as aquisições de imagens de TC, porém pode-se considerar como os principais:

- Tipo de Aquisição, como dito, sequencial (aquisição sem movimento concomitante da mesa) ou helicoidal/volumétrica (aquisição com movimento concomitante da mesa de exames);

- Tensão ou diferença de potencial elétrico aplicado ao tubo de raios X (determinante da energia cinética dos fótons, logo, da capacidade de penetração destes no corpo examinado). Vulgarmente chamado de “kV”, uma alusão à unidade de medida utilizada “quilovolt”. Normalmente entre 80 e 140 kV;
- Corrente elétrica propagada entre catodo e anodo do tubo de raios X (determinante da quantidade de fótons aplicados ao corpo examinado, logo, da quantidade de ruído quântico presente na imagem, quanto maior a corrente, menor a quantidade de ruído, e da dose de radiação ionizante aplicada). Vulgarmente chamado de “mA”, em alusão à unidade de medida utilizada “miliampère”. Normalmente entre 10 e 500mA;
- Espessura do corte, determinante do tamanho das estruturas distinguíveis nas imagens, quanto mais fino for o corte, menor será a estrutura visível. Normalmente entre 0,5 e 10mm;
- Campo de Visão (ou field of view, FOV), função do tamanho da anatomia a ser examinada. Normalmente entre 200 e 600mm;
- Pitch, relação entre a velocidade de movimento da mesa de exames em função da velocidade de rotação da parte rotacional do TC. Quanto maior o pitch mais rápidos serão os exames, maior a susceptibilidade aos artefatos de aquisição helicoidal, menor a dose da radiação aplicada e pior a qualidade da imagem;
- Filtro de Convolução, algoritmo de reconstrução, determinado em função do tipo de tecido examinado.

À composição dos parâmetros destacados acima (e de outros não citados) dá-se o nome de protocolo de exame. Esses protocolos são criados em função da região examinada, das características dos pacientes, do princípio do uso das menores doses de radiação ionizante possíveis (princípio de ALARA), das preferências dos médicos radiologistas e das políticas de cada unidade.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para alcançar o objetivo final deste trabalho (a simulação do funcionamento de um setor de tomografia computadorizada) foram, primeiramente, estudados os processos de obtenção do exame de TC, o mercado mundial de equipamentos de TC novos e as opiniões dos profissionais envolvidos com setores de TC sobre o processo de especificação destes aparelhos. A partir do estudo dos processos foi possível a criação de modelos e a simulação destes.

### **4.1. Dados**

Para a criação dos modelos simulados neste trabalho foi necessário estudar os processos de obtenção dos exames de TC. Para tal, esses processos foram caracterizados, divididos em etapas e medidos os tempos de cada uma destas etapas.

Os tempos foram medidos a partir de pesquisa *in loco* nos serviços de TC em hospitais e clínicas médicas (vide abaixo). Os dados coletados se referem aos métodos utilizados por cada serviço para a execução dos exames de TC, assim como referentes às condições de exame em geral, consistindo de:

- Os tempos despendidos em cada etapa do processo de cada tipo de exame/anatomia examinada. Para tal, estes tempos foram medidos e classificados com o tipo de exame;
- A quantidade mensal média de exames executados por mês. Dados obtidos na unidade onde mais exames foram acompanhados. Esses dados serviram para a determinação percentual da execução dos tipos de exames (anatomia examinada, uso de meios de contraste e quantidade de exames não agendados).

#### **4.1.1. Aparelhos estudados**

Considerando-se que mesmo aparelhos de TC mais simples são capazes de fazer a maioria dos exames com boa qualidade diagnóstica (JIANG, 2009), os aparelhos de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes foram os escolhidos para análise, por representarem bem os tipos de aparelhos utilizados nas unidades de saúde brasileiras.

Para a medição dos tempos dos processos de exames de TC foram acompanhados exames em 11 aparelhos das marcas Toshiba (1, 4 e 16 cortes), Philips (2 cortes) e Siemens (2 e 128 cortes) instalados em 9 unidades de saúde localizadas em quatro cidades do estado do Rio de Janeiro e 1 em Minas Gerais (3 clínicas radiológicas, 3 clínicas gerais, 4 hospitais gerais, todos particulares, exceto um hospital filantrópico). Foram estudados dois modelos de um corte, "*single slice*": 1 do ano de 1998 e 3 de outro modelo, sendo 1 de 2003 e os demais de 2009. Os TC de 2 cortes, "*dual slices*", foram fabricados em 2008, o de 4 cortes, "*4-slices*", em 2005, os dois de 16 cortes, "*16-slices*", em 2011 e o de 128, "*128-slices*", em 2014. Devido às facilidades encontradas na unidade, representatividade do mercado e pela aplicabilidade dos modelos de 4 cortes, este aparelho foi escolhido para ser estudado mais detalhadamente.

## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Medições

Apesar de alguns exames possuírem mais etapas, como, aplicação de contraste, mudança de protocolo, múltiplas etapas de aquisição, movimento do contraste ou reposicionamento do paciente, o processo de execução dos exames foi dividido em seis etapas (presentes em todos os exames, mesmo nos mais sofisticados) definidas como:

1. **Entrada do paciente:** da chegada da guia de exame até a entrada do paciente na sala;
2. **Preparação do paciente:** da entrada do paciente até o seu posicionamento, incluindo o tempo para troca de roupa;
3. **Posicionamento do paciente:** do posicionamento do paciente na mesa de exames até a entrada de dados no computador do TC;
4. **Entrada de dados:** da entrada dos dados no computador até o início do exame;
5. **Aquisição:** do início ao fim da aquisição do exame (tempo do exame);
6. **Saída:** do fim da aquisição até a saída do paciente da sala, incluindo o tempo para troca de roupa.

As medidas de tempo foram feitas por duas pessoas que observavam as etapas dos exames sem comentar ou interferir nos processos, utilizando um *software* de cronômetro para sistemas "Android" com precisão de 1 centésimo de segundo. Os valores foram

arredondados eliminando os décimos de segundo. Assim, os tempos foram medidos em minutos (') e segundos ("). Para uso no *software* MedModel<sup>®</sup>, os tempos foram convertidos para a base decimal.

A partir dos tempos medidos foram calculados mínimos, máximos, as médias e desvios padrão para cada uma das tecnologias. Em caso de existência de valores discrepantes, os cálculos foram feitos com e sem esses valores.

Segundo CHWIF e MEDINA (2015), as distribuições de probabilidade contínuas mais comumente usadas em modelos de simulação probabilísticos são: gama, lognormal, exponencial, normal, uniforme, triangular e weibull.

Para a determinação da distribuição mais adequada a cada um dos tempos e os seus respectivos parâmetros, foi utilizado o *software* StatFit<sup>®</sup> (GEERMS, 2017) que permite o ajuste dos resultados à sintaxe do *software* MedModel<sup>®</sup>, daí o formato utilizado: “mínimo + L ((Média – mínimo), desvio padrão)” para distribuições lognormais e “mínimo + E (desvio padrão)” para distribuições exponenciais. O *software* StatFit<sup>®</sup> utiliza os testes Kolmogorov–Smirnov, Qui-quadrado e Anderson Darling para testar a aderência dos dados à curva de distribuição de probabilidade escolhida.

Os tempos para a obtenção da documentação e do diagnóstico final não foram medidos devido às diferenças entre as políticas de cada unidade. No caso da documentação dos exames, nas unidades estudadas poder-se-ia: imprimir em filme radiográfico, imprimir em papel comum e mesmo não imprimir, gravando-se somente um CD com as imagens. Para a geração do diagnóstico radiológico final, as unidades se diferenciavam tendo médicos presentes, médicos "on-line" (que recebem as imagens via internet e respondem com o laudo após a análise das mesmas) e médicos que visitam as unidades em dias específicos. Também não foram estudadas a qualidade das imagens produzidas, as doses de radiação ionizante recebida pelos pacientes nem a aplicabilidade dos equipamentos das diversas tecnologias estudadas.

#### **4.2.2. Pesquisas Preliminares**

Para auxiliar o embasamento deste trabalho, duas outras metodologias de análise foram utilizadas: uma entrevista com o objetivo de conhecer o comportamento dos gestores de serviços de TC no momento da aquisição/substituição de um TC e; uma pesquisa utilizando a internet para conhecer os equipamentos ofertados nos diversos mercados de TCs novos pelo mundo.

## **Questionários aplicados aos profissionais envolvidos com TC**

Para entender o que os profissionais envolvidos com serviços de TC pensam sobre os parâmetros importantes na especificação de um TC para compra, optou-se por uma pesquisa fechada utilizando um questionário *on line* utilizando um site especializado em pesquisas de opinião. Esta escolha se deu pela facilidade e simplicidade tanto no processo de criação do questionário quanto no de respostas e na coleta dos resultados. Este questionário permitiu coletar opiniões de profissionais envolvidos com serviços de TC quanto aos parâmetros determinantes na especificação de um TC para aquisição inicial e/ou substituição de um já instalado. Esta pesquisa foi aplicada a 19 profissionais no Brasil e 10 em países estrangeiros (Costa Rica, México e Sudão). Estes países foram escolhidos em função do conhecimento de membros do laboratório onde este trabalho foi desenvolvido. Foi pedido que dessem pesos de 1 a 11 para 10 parâmetros pré-determinados e 1 “outro” a ser destacado pelo pesquisado, nas duas situações citadas acima. Foi indagado ainda o que esperam de um TC que produza mais cortes simultâneos que o(s) modelo(s) com que estão relacionados. As imagens dos questionários aplicados estão no item 9.2. O conteúdo da pesquisa está listado abaixo:

**1ª. questão:** Qual a sua função?

**Opções:** Diretor/Gestor/Empresário; Engenheiro/Técnico; Estudante; Físico Médico; Médico; Operador; Outro.

**2ª. questão:** Enumere sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (11)) os fatores que considere importantes no processo de troca/aquisição de um TC numa condição genérica:

**Opções:** Atualidade tecnológica; Capacidade diagnóstica (para exames específicos); Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.); Disponibilidade de Peças; Dose de radiação ionizante emitida; Fabricante; Facilidade/Dificuldade de Manutenção; Produtividade; Qualidade diagnóstica genérica; Valor de aquisição/Condições de pagamento; Outros.

**3ª. questão:** Considerando o (a) setor/unidade em que trabalha, em caso de substituição do equipamento de TC atual, considerando suas possíveis limitações, quais características consideraria na escolha de um aparelho substituto? Enumere um ou mais itens sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (11)):

**Opções:** Atualidade tecnológica; Capacidade diagnóstica (para exames específicos); Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.);

Disponibilidade de Peças; Dose de radiação ionizante emitida; Fabricante; Facilidade/Dificuldade de Manutenção; Produtividade; Qualidade diagnóstica genérica; Valor de aquisição/Condições de pagamento; Outros.

**4ª. questão:** O que esperaria obter ao adquirir um tomógrafo multi slice que produza um maior número de cortes por rotação em relação a outro que produza menos cortes? Enumere um ou mais itens sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (7)):

**Opções:** Maior Capacidade diagnóstica; Maior/Menor Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.); Maior/Menor Disponibilidade de Peças; Maior/Menor Dose de radiação ionizante emitida; Maior/Menor Facilidade de Manutenção; Aumento da Produtividade; Outros.

### **Pesquisa nos “sites” dos fabricantes de TC**

Para um melhor entendimento da realidade do mercado mundial de TC e os modelos “de entrada” disponíveis, foi feita uma pesquisa na internet sobre quais são os fabricantes de TCs de corpo inteiro no mundo. Usando o site de pesquisa Google, foram utilizadas as palavras chaves: "Computed Tomography" e "Manufacturer". Uma vez determinados os fabricantes, foi feita uma pesquisa nos seus “sites” internacionais. A partir desses, foram acessados os “sites” de países de cada um dos continentes e pesquisados os modelos "de entrada", ofertados por cada fabricante, com o objetivo de determinar quais os modelos mais simples, e, conseqüentemente, mais baratos oferecidos em cada mercado. Essa pesquisa foi feita entre janeiro a maio de 2015 e foi atualizada em março de 2016.

#### **4.2.3. Cálculo da Produtividade**

No presente estudo definiu-se “produtividade” como a capacidade dos fatores de produção (no caso estudado, o TC) em criar um produto (exames de TC) em um determinado período de tempo. A partir das médias dos tempos medidos foram calculadas as médias para cada tecnologia, e as produtividades máximas esperadas.

As produtividades esperadas foram calculadas utilizando-se um método heurístico. Para o cálculo destas foram consideradas jornadas semanais de trabalho de 66 horas, assumindo plantões de 12 horas de segunda a sexta e de 6 horas aos sábados, condição típica das clínicas radiológicas estudadas. Supôs-se constante a distribuição de exames e as técnicas de operação dos aparelhos. A produtividade foi calculada dividindo-se o tempo total de trabalho semanal (3960 minutos) pelo tempo médio calculado total de cada



uma das tecnologias, e considerados os valores inteiros. Os valores calculados não consideram critérios como resfriamento do aparelho ou pausa para reconstrução de imagens.

#### 4.2.4. Simulações

##### 4.2.4.1. O modelo inicial

Para a construção do modelo inicial de estudo de um setor de TC, assumiu-se um modelo de distribuição normal para os tempos como forma de simplificação, nos modelos posteriores os valores foram ajustados às respectivas curvas de probabilidade. Assim, foram utilizados os tempos médios e desvios padrões das etapas dos exames realizados no aparelho de 4 cortes, obtidos por meio dos procedimentos especificados no item 4.2.1. A estrutura de funcionamento do setor de TC modelado foi baseada nas estruturas encontradas nas unidades visitadas para coleta de dados. Os tempos foram convertidos para decimal para uso no *software* escolhido. No modelo inicial, não foram extraídos os valores discrepantes.

Os modelos de simulação foram criados no *software* MedModel<sup>®</sup>. Os parâmetros utilizados no primeiro modelo foram:

- **Locais:** Entrada/saída, Sala de espera (com capacidade para 10 pacientes), Vestiário, TC e Console.
- **Recurso:** O operador do TC (um técnico a cada 24 horas);
- **Entidades:** São os pacientes. Estes entram no processo como “paciente” e ao se dirigirem à sala de espera se tornam paciente de exame de Crânio, Tórax, Abdome e Pelve, Coluna e Face, com distribuição percentual baseada na tabela 27 no item 9.1.3. Os exames de Abdome e Pelve, que são executados simultaneamente, foram agrupados em um único modelo;
- **Processos:** Os pacientes aguardam na sala de espera o tempo referente à etapa “Entrada do paciente” e se encaminham para o vestiário, utilizando o operador. No vestiário os pacientes utilizam, para trocar de roupa, o tempo referente à etapa “Preparação do paciente”. O paciente se move para o TC utilizando o operador. Para o posicionamento do paciente no TC o operador é demandado pelo tempo referente a etapa “Posicionamento do paciente”. Nesse momento, ocorre à etapa “Entrada de dados” e o operador é demandado pelo tempo referente a essa para

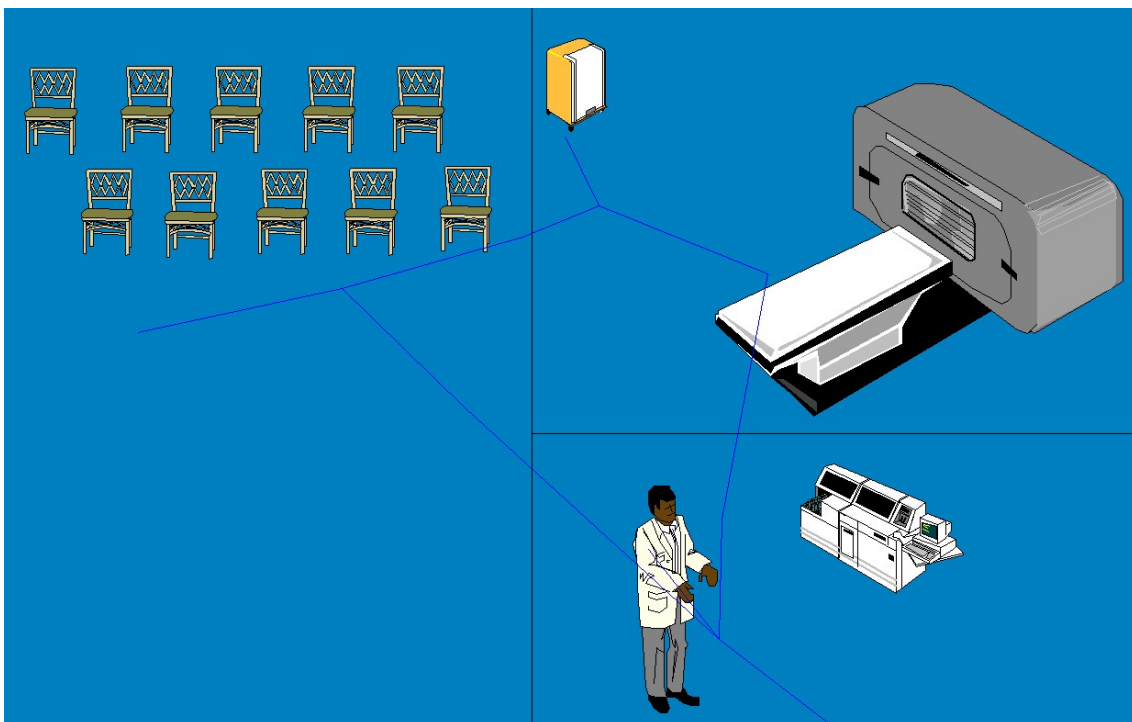
inserir os dados do paciente no computador do tomógrafo. Após essa etapa, ocorre a etapa “Aquisição”, quando o exame é executado, demorando os tempos específicos para cada tipo de exame, crânio, tórax, abdome e pelve, coluna e face. Após a aquisição, os pacientes são levados pelo operador ao vestiário, essa é a etapa “Saída” e são encaminhados à saída pelo operador. Os tempos de cada etapa do processo foram calculados a partir dos tempos dos exames medidos no TC de 4 cortes;

- **Chegadas:** As entidades (pacientes) chegavam, uma a uma, em intervalos constantes de 12 minutos, sem limite de quantidade.

O modelo simulou a operação do setor de tomografia durante 12 horas ininterruptas. Foram feitas 5 replicações.

A partir deste modelo, novas simulações foram feitas utilizando dados dos outros aparelhos estudados e novas estruturas com alteração dos processos (cenários alternativos).

A Figura 8 apresenta a imagem do modelo inicial criado no *software* Medmodel<sup>®</sup>.



**Figura 8:** Imagem do modelo inicial de um serviço de TC criado no *software* MedModel<sup>®</sup>

A partir deste modelo simples, outros foram criados com a adição de novos parâmetros e cenários, tornando-os mais realistas.

#### 4.2.4.2. Modelo para estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento

O impacto de alterações estruturais foi avaliado a partir do modelo descrito na Seção 4.2.4.1. Uma parte dos resultados desta simulação foi apresentado no IUPESM 2018 e publicado em SANTOS *et al.*, 2019a (o texto do artigo pode ser encontrado no Apêndice C).

Os parâmetros utilizados neste modelo foram:

- **Locais:** Os mesmos do modelo anterior, porém foram simulados cenários com 2 vestiários;
- **Recursos:** Um operador de TC e um profissional de enfermagem (em plantões de 24 horas). Foram definidas paradas programadas (troca de turno e refeições) e aleatórias para os recursos;
- **Entidades:** São os pacientes, divididos em: agendados sem contraste, agendados com contraste e emergenciais (não agendados). Foram estabelecidas prioridades de atendimento iguais para os pacientes agendados, porém para os pacientes de emergência, foi definida uma prioridade maior;
- **Processos:** Como dito, os tempos de cada etapa do processo foram calculados a partir dos tempos dos exames medidos em todos os TCs estudados e ajustados às suas respectivas curvas de distribuição de probabilidade. Este modelo difere os tempos da etapa de aquisição entre os tipos de TCs, os tempos das outras etapas são iguais para todos os TCs estudados. Os pacientes aguardam na sala de espera o tempo referente à etapa “Entrada do paciente” e encaminham-se para o vestiário, utilizando um recurso. No vestiário os pacientes utilizam, para trocar de roupa, o tempo referente à etapa “Preparação do paciente”. O paciente move-se para o TC utilizando um recurso. Para o posicionamento do paciente no TC um recurso é demandado pelo tempo referente à etapa “Posicionamento do paciente”. Nesse momento, ocorre a etapa “Entrada de dados”, quando o operador é demandado pelo tempo referente a essa para inserir os dados do paciente no computador do tomógrafo, ocorrendo então a etapa “Aquisição”, quando o exame é executado, sempre utilizando o operador, e durando os tempos específicos para cada tipo de TC. Nos exames contrastados, um recurso é demandado por 2 min para a instalação do acesso venoso e por 2 min para a

aplicação do contraste, e mais duas aquisições ocorrem com os mesmos tempos da aquisição padrão. Após a aquisição, os pacientes são levados pelo operador ao vestiário, essa é a etapa “Saída” e são encaminhados à saída pelo operador. Nos exames contrastados, o operador é utilizado durante 1 min para retirar o acesso venoso. Os tempos para instalação e retirada do acesso venoso e aplicação do contraste foram arbitrados a partir dos tempos observados nas visitas;

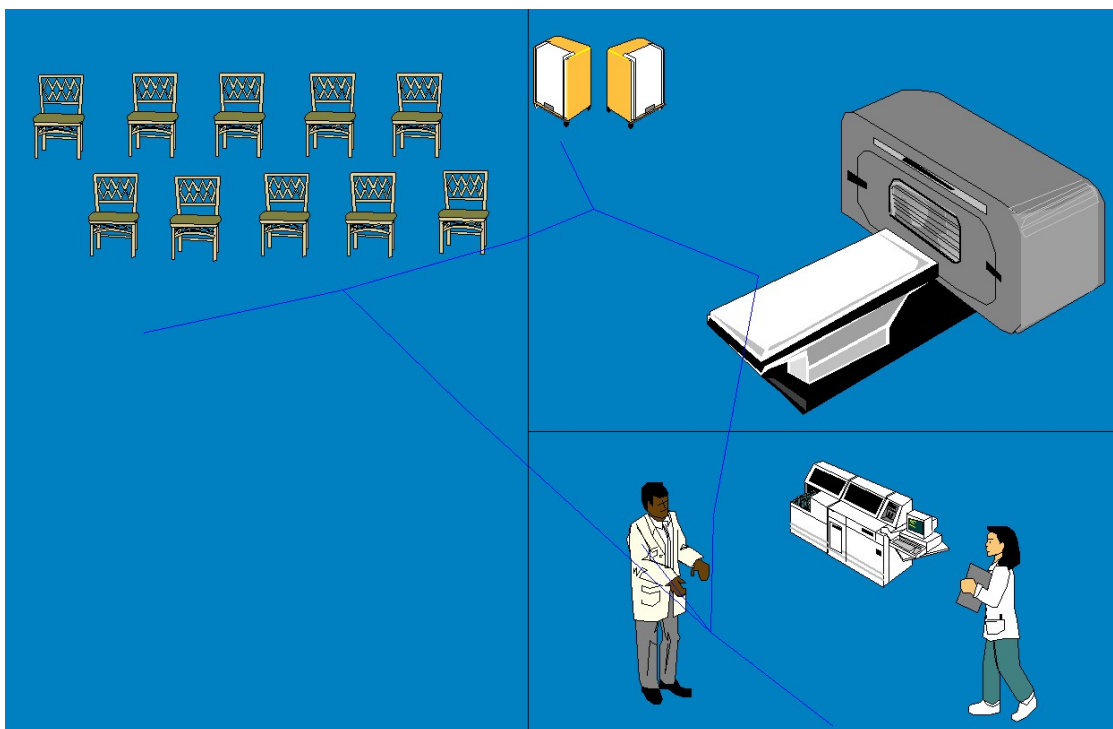
- **Chegadas:** Foram simuladas as chegadas diárias de trinta pacientes agendados sem contraste e cinco com contraste (distribuídos uniformemente no período estudado do dia, sem chegadas nas pausas programadas dos recursos) e dezessete pacientes de emergência (atendimento 24 horas);
- **Cenários:** Oito cenários foram criados e estudados para os TCs de 1, 4 e 128 cortes:
  1. 1 operador, 1 vestiário e agendamento de 7:00 às 20:00 h.;
  2. Adição de agendamento durante às 24 h. ao cenário 1;
  3. Adição de 1 profissional de enfermagem ao cenário 1;
  4. Adição de agendamento durante às 24 h. e de 1 profissional de enfermagem ao cenário 1;
  5. Adição de 1 vestiário ao cenário 1;
  6. Adição de 1 vestiário e agendamento durante às 24 h. ao cenário 1;
  7. Adição de 1 vestiário e 1 profissional de enfermagem ao cenário 1;
  8. Adição de 1 vestiário, agendamento durante 24 horas e 1 profissional de enfermagem ao cenário 1.

Foram feitas 5 replicações da simulação do funcionamento de um setor de TC localizado em um hospital operando 24 horas diariamente, durante 1 mês.

A simulação focou no tempo médio de permanência dos pacientes no sistema, desde a chegada até a saída. Os tempos médios dos exames foram baseados na média ponderada pelo número de exames mensais para cada tipo de paciente (840 exames agendados sem contraste, 140 com contraste e 476 exames de emergência). Assim:

Tempo médio ponderado = ((tempo médio paciente agendado \* n° de pacientes agendados atendidos) + (tempo médio paciente agendado c/contraste \* n° de pacientes agendados c/contraste atendidos) + (tempo médio paciente emergência \* n° de pacientes emergência atendidos)) / n° total de paciente atendidos.

A Figura 9 apresenta a imagem da simulação dos cenários com 2 vestiários, 1 operador de TC e 1 profissional de enfermagem.



**Figura 9:** Imagem de um modelo de um serviço de TC criado no *software* MedModel® com 2 vestiários, 1 operador e 1 profissional de enfermagem.

#### 4.2.4.3. Modelo para estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente

Um terceiro modelo foi criado para estudar a rentabilidade de setores de TC a partir de sua construção comparando os efeitos da aquisição de aparelhos novos e usados de 1, 2, 4, 16, 128 cortes. Um trabalho com resultados destas simulações foi apresentado no CBEB 2018 e publicado em SANTOS et al., 2019b e o texto do artigo pode ser encontrado no Apêndice C.

Os parâmetros utilizados neste modelo foram:

- **Locais:** Mesmos do modelo do item 4.2.4.1;
- **Recursos:** Mesmo do modelo do item 4.2.4.1, adicionando paradas programadas (troca de turno e refeições) e aleatórias;
- **Entidades:** Mesmas do modelo do item 4.2.4.2;

- **Variáveis:** Foram adicionadas variáveis para adição de receitas (recebimento pelos exames executados) e despesas (aquisição do aparelho, obra civil, pagamento dos funcionários, compra de insumos, etc.).
- **Processos:** Esse modelo difere os tempos da etapa de aquisição entre os tipos de TCs. Até a etapa “Entrada de dados”, as etapas são idênticas às do item 4.2.4.1. Então, ocorre a etapa “Aquisição”, utilizando o operador pelos tempos específicos de cada tipo de TC, obtidos pelos procedimentos descritos no item 4.2.2. Nos exames contrastados, o operador é demandado por 2 min para a instalação do acesso venoso e por 2 min para a aplicação do contraste, e mais duas aquisições ocorrem com os tempos da aquisição padrão. Nesses exames, o operador é utilizado por 1 min, com prioridade alta, para retirar o acesso venoso. Então, os pacientes são levados pelo operador ao vestiário, quando ocorre a etapa “Saída do paciente”, ao fim dessa, os pacientes saem do sistema. Os tempos para instalação e retirada do acesso venoso e aplicação do contraste foram arbitrados a partir dos tempos observados durante a pesquisa;
- **Chegadas:** Foram simuladas duas taxas de chegadas distintas (descritas abaixo). Dos pacientes, 60% eram agendados sem contraste, 10% com contraste e 30% eram pacientes de emergência, com chegadas distribuídas uniformemente durante as 24 horas do dia, sem pausas programadas;
- **Cenários:** A partir de condições encontradas em unidades em início de funcionamento, foram criados quatro cenários que foram simulados para as cinco tecnologias de TCs estudadas:
  1. Obras de instalação desnecessárias. A operação começa com 50 exames/mês com uma taxa de aumento mensal do número de exames de 10% no primeiro ano, 5% no segundo e 2% no terceiro;
  2. Cenário 1 com acréscimo dos custos das obras físicas necessárias ao funcionamento do setor;
  3. Obras de instalação desnecessárias. Também começa com 50 exames/mês, porém com uma taxa de aumento mensal do número de exames de 15% no primeiro ano; 7% no segundo e 3% no terceiro.
  4. Cenário 3 com acréscimo dos custos das obras físicas necessárias ao funcionamento do setor.

Somente os cenários 3 e 4 foram simulados para o TC de 128 cortes. Assim, 18 combinações diferentes foram simuladas.

Nos cenários 1 e 3, foi considerado que não seria necessário nenhum aumento de potência elétrica disponível para a instalação dos TCs e a área precisaria somente de pequenos ajustes como proteção radiológica, refrigeração e instalação elétrica. Nos cenários 2 e 4, seriam necessárias obras e aumento de carga elétrica, o que aumentaria o investimento inicial necessário.

Os custos das obras, da instalação e de operação foram inferidos usando como exemplo uma unidade localizada na cidade do Rio de Janeiro. O valor da instalação sem obra física foi de R\$ 38.000,00 (Cenários 1 e 2) e de R\$ 92.000,00 com obra física (Cenários 3 e 4).

Os valores de aquisição dos aparelhos de TC foram:

- 1 corte: R\$ 300.000,00 para equipamentos novos e R\$ 180.000,00 para os usados;
- 2 cortes: R\$ 450.000,00 novos e R\$ 220.000,00 usados;
- 4 cortes: R\$ 580.000,00 novos e R\$ 350.000,00 usados;
- 16 cortes: R\$ 800.000,00 novos e R\$ 500.000,00 usados;
- 128 cortes: R\$ 1.600.000,00 novo e R\$ 1.100.000,00 usados.

O custo mensal fixo, incluindo a contratação de 7 operadores de TC em plantões de 24 horas por semana e o consumo de energia em estado de espera, foi inferido em R\$ 30.000,00 durante o período de garantia dos TC (1 ano nos aparelhos novos e 3 meses nos usados). Após os períodos de garantia, R\$ 3.000,00 eram adicionados aos gastos mensais a título de contrato de manutenção. Custo da execução de um exame básico foi calculado em R\$ 70,00, cobrindo o custo do laudo, o consumo proporcional do tubo de raios x, o consumo de energia elétrica na execução do exame e outros insumos diversos. Para exames utilizando contraste radiopaco, mais R\$ 90,00 eram adicionados. O valor recebido por cada exame foi definido em um patamar um pouco acima do praticado pelo Sistema Único de Saúde (SUS) (CRM/MG, 2015), para exames sem contraste, R\$ 240,00 e R\$ 360,00 nos exames com uso de contraste. Esses valores incluem um desconto de 20% de impostos.

Os percentuais referentes às distribuições dos tipos de pacientes e das taxas de crescimento de demandas, foram arbitrados a partir de valores típicos encontrados no mercado.

Foi simulada a operação de um setor de TC localizado em um hospital fictício operando 24 horas diariamente, durante 3 anos. Considerou-se que esse período seria suficiente para o reconhecimento da viabilidade econômica do empreendimento e redução do efeito da pseudo-aleatoriedade inerente ao processo de simulação.

#### **4.2.4.4. Modelo com TC(s) de 4 cortes com diferentes estruturas para unidades com grande demanda de exames**

Foram criados modelos utilizando 1 ou 2 TC(s) de 4 cortes com estruturas organizacionais diferentes e demandas diversas de exames, perfazendo um total de 35 combinações.

Os parâmetros utilizados neste modelo foram:

- **Locais:** Entrada/saída, Entrada de pacientes de emergência (sem definição de turnos de funcionamento), Sala de espera (com capacidade para 10 pacientes), Sala de espera de pacientes de emergência (com capacidade para 3 pacientes), 1, 2 ou 4 Vestiário(s), 1 ou 2 TC(s) e Console. Foram adicionadas paradas programadas (manutenções agendadas) e não programadas (manutenções de emergência) ao local “TC”. O local “Entrada/Saída” funciona obedecendo à definição de turno dos recursos, logo, fora do turno de trabalho dos recursos, este local permanece fechado não permitindo entrada de pacientes.
- **Recursos:** Um operador de TC e um profissional de enfermagem. Foram definidas paradas programadas (troca de turno e refeições), e paradas aleatórias para os recursos;
- **Entidades:** São os pacientes, divididos em: agendados sem contraste, agendados com contraste e emergenciais (não agendados). Foram estabelecidas prioridades de atendimento iguais para os pacientes agendados, porém para os pacientes de emergência, foi definida uma prioridade maior.
- **Variáveis:** Contagem do tempo de espera do paciente, contagem de pacientes perdidos, controle das paradas programadas e não programadas do(s) TC(s), adição de receitas e despesas.
- **Atributos:** Para a determinação do tipo de exame a ser executado em cada uma das entidades, foi adicionado um atributo a estas.



- **Processos:** Os modelos diferem os tempos da etapa de aquisição em função do tipo de exame executado. Os pacientes de emergência entram no sistema pelo local Entrada de pacientes de emergência e aguardam na sala de espera de emergência, já os agendados entram pelo local Entrada/Saída e aguardam atendimento na sala de espera. Se não houver TC disponível para uso ou o início do exame demorar mais que 60 minutos os pacientes saem do sistema, caso contrário, ocorre a etapa “Entrada do paciente” e se encaminham para o vestiário, utilizando um recurso. No vestiário, os pacientes demoram para trocar de roupa o tempo referente à etapa “Preparação do paciente”, e se encaminham para o TC utilizando um recurso para o TC disponível, caso não haja, os pacientes saem do sistema. Para o posicionamento do paciente no TC um recurso é demandado pelo tempo referente à etapa “Posicionamento do paciente”. Nesse momento ocorre a etapa “Entrada de dados” e o operador é demandado pelo tempo referente a essa para inserir os dados do paciente no computador do tomógrafo. Então a etapa “Aquisição” ocorre, quando o exame é executado, sempre utilizando o operador e demorando os tempos específicos para cada tipo de exame, obtidos pelos procedimentos descritos no item 4.2.2. Nos exames contrastados um recurso é utilizado, com prioridade mais alta, pelo tempo  $N(2; 0,5)$  min para a instalação do acesso venoso e por  $N(1,5; 1)$  min para a aplicação do contraste. Nos exames contrastados de crânio e tórax, uma aquisição foi adicionada, nos de abdome, três aquisições foram adicionadas com períodos de espera de 0,5 min entre a primeira e a segunda e de 2 min entre a segunda e a terceira aquisição. Esses períodos se referem ao movimento do contraste no paciente. Nos exames contrastados, um recurso é utilizado, com prioridade alta, durante 1 min para retirada do acesso venoso. Após essa etapa, os pacientes são levados por um recurso ao vestiário, quando ocorre a etapa “Saída do paciente”, ao fim dessa, os pacientes saem do sistema. Os tempos para instalação e retirada do acesso venoso, aplicação do contraste e entre aquisições “contrastadas” foram arbitrados a partir dos tempos observados durante a pesquisa;
- **Chegadas:** Foram simuladas oito taxas de chegadas distintas, que são apresentadas na Tabela 8;
- **Cenários:** Foram simulados seis cenários:

  1. 1 TC com 1 vestiário sem enfermagem (investimento inicial de R\$ 772.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 33.000,00);

2. 1 TC com 2 vestiários sem enfermagem (investimento inicial de R\$ 774.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 33.000,00);
3. 1 TC com 1 vestiário com enfermagem (investimento inicial de R\$ 772.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 59.000,00);
4. 1 TC com 2 vestiários com enfermagem (investimento inicial de R\$ 774.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 59.000,00);
5. 2 TCs com 4 vestiários sem enfermagem (investimento inicial de R\$ 1.544.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 36.000,00);
6. 2 TCs com 4 vestiários com enfermagem (investimento inicial de R\$ 1.544.000,00 e custo mensal fixo de R\$ 62.000,00).

Os valores dos TCs novos foram os mesmos utilizados no modelo anterior, item 4.2.4.3, exceto os aparelhos de 4 e 16 cortes que foram atualizados. Assim os novos valores foram:

- 4 cortes: R\$ 680.000,00 novos;
- 16 cortes: R\$ 900.000,00 novos.

Os custos dos exames e os valores cobrados por esses exames nesse modelo foram:

- Crânio sem contraste: custo: R\$ 70,00  
valor cobrado líquido: R\$ 203,00
- Crânio com contraste: custo: R\$ 150,00  
valor cobrado líquido: R\$ 303,00
- Tórax sem contraste: custo: R\$ 75,00  
valor cobrado líquido: R\$ 251,00
- Tórax com contraste: custo: R\$ 160,00  
valor cobrado líquido: R\$ 351,00
- Abdome sem contraste: custo: R\$ 80,00  
valor cobrado líquido: R\$ 427,00
- Abdome com contraste: custo: R\$ 200,00  
valor cobrado líquido: R\$ 527,00
- Face sem contraste: custo: R\$ 70,00  
valor cobrado líquido: R\$ 204,00
- Coluna sem contraste: custo: R\$ 75,00  
valor cobrado líquido: R\$ 204,00

Após a execução de cada exame, despesas e receitas diferenciadas pelo tipo de exame foram adicionadas às respectivas variáveis.

Não foram simulados cenários com equipamentos usados e sem obras iniciais.

As taxas foram definidas abrangendo desde condições de pouca demanda sem contingenciamento de pacientes, até situações que provocassem a formação de filas e pudessem representar uma condição limite para tecnologias de TC diversas.

Foi criado um indicador relacionando o tempo de exame e a lucratividade após 4 anos. Para tornar os resultados próximos da ordem das unidades, o valor do tempo médio ponderado foi multiplicado por 1.000.000. Assim:

Indicador Lucro/tempo = Lucro após 4 anos / (1.000.000 x tempo médio ponderado)

Foram calculados os tempos médios ponderados dos exames para cada uma das taxas simuladas.

No cálculo do lucro após 4 anos, foram considerados somente os milhares de reais, não sendo expostos os valores até as centenas, assim, nas tabelas com os resultados, os valores são apresentados em “milhares de reais”.

O modelo simulou o funcionamento de um setor de TC localizado em um hospital fictício operando 24 horas diariamente, durante 4 anos. Foram feitas 10 replicações.

#### **4.2.4.5. Modelo com TC(s) das 5 tecnologias estudadas com diferentes estruturas para unidades com grande demanda por exames**

Foram criados modelos utilizando 1 ou 2 TCs de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes com diversas estruturas organizacionais e demandas de exames, perfazendo 29 combinações.

Os parâmetros utilizados neste modelo foram os mesmos do anterior, exceto:

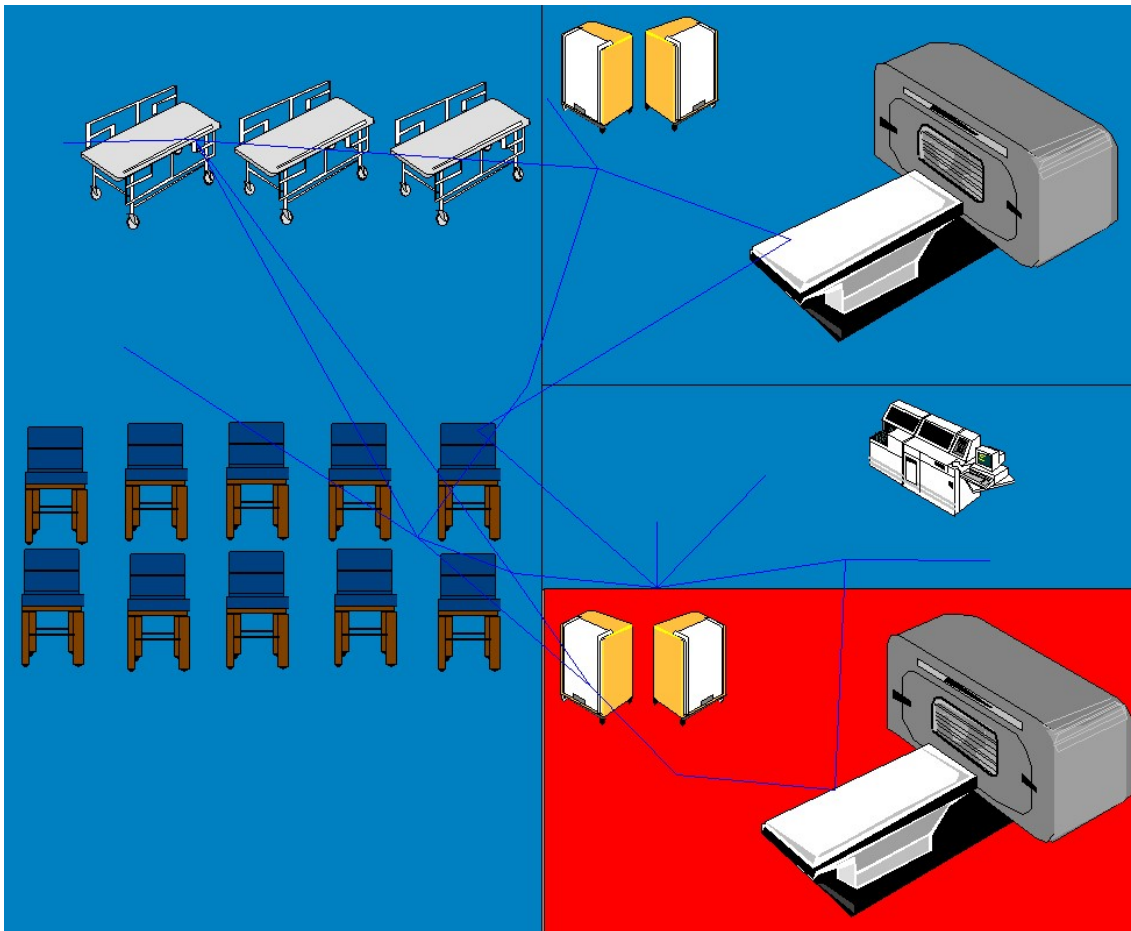
- **Processos:** Esse modelo difere os tempos da etapa de aquisição pelo tipo de TC e não pelo tipo de exame como o modelo anterior. Os modelos diferem dos modelos do item 4.2.4.4 após a inserção dos dados do paciente no computador do TC. Então, ocorre a etapa “Aquisição”, quando o exame é executado, sempre utilizando o operador e durando os tempos específicos para cada tipo de TC. Após essa etapa, todas serão iguais às dos modelos do item 4.2.4.4.
- **Chegadas:** Foram escolhidas e simuladas três taxas de chegadas distintas que sugeriam ser o limite para algum tipo de TC estudado. Essas taxas são apresentadas na Tabela 15;

- **Cenários:** Foram simulados seis cenários:
  1. 1 TC com 1 vestiário sem enfermagem com a primeira taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 33.000,00);
  2. 1 TC com 2 vestiários sem enfermagem com a primeira taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 33.000,00);
  3. 1 TC com 1 vestiário com enfermagem com a primeira taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 59.000,00);
  4. 1 TC com 2 vestiários com enfermagem com a segunda taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 59.000,00);
  5. 2 TCs com 4 vestiários sem enfermagem com a primeira taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 36.000,00);
  6. 2 TCs com 4 vestiários com enfermagem com a terceira taxa de chegada (custo mensal fixo de R\$ 62.000,00).

Os custos dos exames e os valores cobrados por esses exames foram iguais aos do modelo da seção 4.2.4.4.

Após a execução de cada exame, despesas e receitas diferenciadas pelo tipo do exame foram adicionadas às respectivas variáveis.

A Figura 10 apresenta a imagem da simulação com 4 vestiários e 2 TCs.



**Figura 10:** Imagem de um modelo de um serviço de TC criado no *software* MedModel® com 4 vestiários e 2 TCs.

## 5. RESULTADOS

As pesquisas *In Loco* nas unidades de saúde e os dados coletados nestas serviram para o conhecimento do processo de execução de exames de tomografia computadorizada, definição das etapas deste processo e determinação dos tempos esperados das etapas e totais desses exames. Estes dados foram utilizados na criação de modelos de simulação por eventos discretos.

As pesquisas preliminares permitiram um melhor conhecimento da oferta de TC nos diversos mercados e o entendimento da visão dos profissionais envolvidos com exames de TC no que se refere a especificação de um TC para compra.

### 5.1. Pesquisas preliminares

#### **Pesquisa sobre especificação de TCs**

No Brasil, o questionário foi respondido por 6 gestores, 4 engenheiros, 1 operador, 3 médicos radiologistas e 4 “outros”. Nestes outros estão agrupados 2 médicos veterinários, 1 tecnólogo e um gestor que, atualmente não atua mais na área de TC, somente com RM. O parâmetro considerado mais importante, tanto na aquisição quanto na substituição foi “custos operacionais”. Retirando-se a opção “outros” da estatística, o item considerado menos relevante nas duas condições de aquisição de TC foi “dose de radiação emitida”. Quando perguntados sobre o que esperam de aparelhos que produzem mais cortes simultâneos, os itens mais votados foram, empatados, “aumento de produtividade” e “maior capacidade diagnóstica”. As imagens dos questionários e os resultados estão nas Figuras 12 a 19 no Apêndice B.

Nos países estrangeiros estudados, o questionário foi respondido somente por engenheiros. O parâmetro “dose de radiação ionizante emitida” foi considerado o mais importante nos dois casos, seguido por “capacidade diagnóstica”. Nos dois casos, “valor de aquisição/condições de pagamento” foi o parâmetro menos importante. Quando indagados sobre os efeitos que a troca por um modelo de TC que produza mais cortes, a expectativa é de se obter “maior capacidade diagnóstica”, seguido da variação da dose de radiação ionizante emitida. As imagens dos questionários e os resultados estão nas Figuras 20 a 27 no Apêndice B.

## O mercado mundial de TC

Na pesquisa foram identificados os fabricantes General Electric (GE), Hitachi, Neusoft, Philips, Siemens, Shimadzu e Toshiba. A Samsung adquiriu a empresa Neurológica (fabricante de TC móveis) e lançou recentemente o seu primeiro modelo fixo; esta não foi incluída neste estudo devido a sua pequena participação no mercado. O mercado brasileiro de TC é dominado principalmente por quatro fabricantes, a norte-americana GE, a holandesa Philips, a alemã Siemens, e a japonesa Toshiba. A chinesa Neusoft e as japonesas Hitachi e Shimadzu também atuam no mercado brasileiro, porém com menor presença. Esta última já fabricou modelos próprios, porém atualmente somente oferece aparelhos Neusoft em mercados como os da Oceania.

Nos *sites* da GE existiam TC de 1 corte na Ásia e de 2 na maioria dos mercados, porém nos EUA o mais simples era um de 40 cortes. Os “sites” africanos eram redirecionados para a Europa (GE, 2016).

A Hitachi oferecia aparelhos a partir de 16 cortes (HITACHI, 2016).

A Neusoft era a empresa que oferecia os modelos mais simples, de 1 de 2 cortes (NEUSOFT, 2016).

A Shimadzu oferecia modelos Neusoft, na América do Sul um modelo de 2 cortes, e na Oceania, um de 16 (SCHIMADZU, 2016).

A Philips oferecia aparelhos a partir de 16 cortes em quase todo o mundo, exceto na Ásia e na América do Sul, onde existiam modelos a partir de 2 (PHILIPS, 2016).

A Siemens oferecia modelos de 2 cortes em quase todos os mercados, a exceção eram os de 6 cortes oferecidos na América do Norte (SIEMENS, 2016).

A Toshiba oferecia, na América do Sul, na Ásia e na África, modelos a partir de 4 cortes. Na América do Norte, na Europa e na Oceania, eram apresentados somente modelos a partir de 16 (TOSHIBA, 2016).

A Tabela 1 apresenta uma síntese do número de canais dos aparelhos de entrada oferecidos nos diversos mercados pelos fabricantes de TC, na época do estudo.

Os resultados dessa etapa foram publicados em SANTOS *et al.*, 2017. O texto integral pode ser encontrado no Apêndice C.

**Tabela 1:** Modelos de “entrada” de TCs (pelo número de cortes) conforme região geográfica e fabricantes. \*

Região	GE	Hit	Neu	Phi	Sie	Shi	Tos
EUA / Canadá / México	40 / 16 / 2	16	2	16	6 / 6 / 2		16
América Central	2			16			
Brasil / América do Sul	2	16		16 / 2	2	2	4
África	Europa			16	2		4
Oceania	16			16	2	16	16
Ásia	1	16	2	2	2		4
Europa	2	16		16	2		16
Global (site único)			2				

\* Pesquisa na Internet concluída em março de 2016.

## 5.2. Tempos dos Processos

Foram visitadas 10 unidades e medidos os tempos dos exames de 11 aparelhos, totalizando 131 exames, obtendo-se, assim, os tempos dos processos para cada tipo de TC. Todas as tabelas com os tempos medidos e calculados no Apêndice A.

Os valores ajustados dos tempos da etapa de aquisição são encontrados no Apêndice A, Tabela 23 para os TC de 1 corte, Tabela 26 para os TC de 2 cortes, Tabela 30 para todos os exames no TC de 4 cortes e Tabela 33 para os 5 tipos de exames no TC de 4 cortes, Tabela 35 para os TC de 16 cortes, Tabela 36 para o TC de 128 cortes, e Tabela 37 (tempos de todas as etapas, exceto aquisição, de todos os TC estudados).

Como dito, os tempos foram convertidos para a forma decimal, ajustados às curvas de distribuições de probabilidades e formatados para uso no *software* MedModel<sup>®</sup>. Assim, as sintaxes utilizadas foram:

- Normal: “N(Média, desvio padrão)”;
- Lognormal: “mínimo + L((Média – mínimo), desvio padrão)” e;
- Exponencial: “mínimo + E (desvio padrão)”.

### TCs de 1 corte

Os resultados referentes aos TC de 1 corte podem ser encontrados nas Tabelas 22 e 23 no Apêndice A.

O primeiro equipamento estudado foi um TC Toshiba Xvision/EX (ano 1998) instalado em uma unidade hospitalar situada na cidade do Rio de Janeiro. Foram



acompanhados 4 exames. O tempo de preparação do paciente para o exame de crânio foi de 6'50" e o da aquisição de imagem foi de 4'26". Os tempos de aquisição nos exames de coluna foram de 8'43", 12'47" e 18'20".

O segundo TC de um corte estudado foi um Toshiba Asteion VP (ano 2010), instalado em um hospital particular na cidade de São João de Meriti, RJ. No dia da pesquisa houve somente um exame, de crânio, que demorou 6'36". Por conta das especificidades da unidade, não foi possível medir os tempos das duas primeiras etapas do processo.

O terceiro equipamento estudado estava instalado em um hospital público na cidade de Barra do Piraí, RJ. Este era igual ao anterior, inclusive no ano de fabricação e instalação. O tempo de chegada da guia não foi medido por conta das características da unidade. Foram acompanhados dois exames. O tempo total do exame de coluna lombar foi de 9'38". Destacam-se o longo tempo de entrada do paciente do exame de crânio: 3'01", e o curto tempo de 2" na etapa de "entrada de dados".

O último TC de um corte estudado foi um Toshiba Asteion VR (ano 2001), instalado em uma clínica particular na cidade do Rio de Janeiro. Foram acompanhados exames em 6 pacientes, sendo 2 exames de abdome e pelve, logo, 8 exames ao todo. O exame mais demorado foi um de mastoide com 16' em contrapartida a um exame de coluna lombar que demorou 5'11". Os tempos de aquisição variaram entre 1'24" em um exame de coluna lombar e 6'16" em um de abdome e pelve. O tempo da etapa de aquisição dos TCs de 1 corte modernos ajustado à sua curva de distribuição de probabilidade foi uma curva lognormal de  $0,269 + L(3,73; 2,27)$  min. Como dito, a sintaxe utilizada pelo *software* utilizado é: "mínimo + L((Média – mínimo), desvio padrão)".

## **TCs de 2 cortes**

Os resultados referentes aos TCs de 2 cortes estão nas Tabelas de 24 a 26 no Apêndice A.

Para o estudo dos tempos dos exames em aparelhos de 2 cortes foram utilizados um TC Siemens Somatom Emotion (ano 2008), instalado em um hospital particular na cidade de Petrópolis, RJ e um TC Philips MX4000 (ano 2008), instalado em um centro médico na cidade do Rio de Janeiro. Foram acompanhados 6 exames no primeiro aparelho e 17 no segundo.

No primeiro TC estudado, a maioria dos pacientes necessitavam de transporte em cadeira de rodas ou em macas. Os tempos de entrada dos pacientes não puderam ser

medidos por causa dos métodos do setor. Os tempos de aquisição neste aparelho variaram entre 3'04" e 1'07" na primeira e na segunda aquisição, respectivamente do exame de crânio. A média do tempo de aquisição deste TC ficou em 2'05" com um desvio padrão de 31", enquanto o tempo médio total ficou em 11'18" com um desvio padrão de 49", ao retirar-se os outliers.

O segundo aparelho estava instalado em uma clínica geral. Nessa unidade o operador tinha, como procedimento, inserir os dados do paciente antes do início do exame, logo, houve exames em que o tempo dessa etapa não foi medido. Os tempos de aquisição deste aparelho variaram entre 1'54" na segunda aquisição de um exame de crânio e seios da face e 4'31" em um exame de abdome. Já os tempos totais variaram entre 6'48" em um exame de coluna lombar e 20'05" em um exame de abdome total e tórax. A média do tempo de aquisição deste TC ficou em 3'15" com um desvio padrão de 52", enquanto o tempo médio total ficou em 10'45" com um desvio padrão de 3'43".

A média do tempo de aquisição dos TCs de 2 cortes ficou em 2'49" com um desvio padrão de 58", enquanto o tempo médio total ficou em 11'27" com um desvio padrão de 4'04". O tempo da etapa de aquisição dos TCs de 2 cortes ajustado à sua curva de distribuição de probabilidade foi uma curva lognormal de  $1+L(1,95; 1,6)$  min.

### **TCs de 4 cortes**

Os resultados referentes ao TC de 4 cortes podem ser encontrados nas Tabelas de 27 a 30 no Apêndice A.

Para o estudo dos tempos dos exames em aparelhos de 4 cortes foi utilizado um TC Toshiba Asteion 4 (ano 2005), instalado em um hospital particular na cidade do Rio de Janeiro. Foram acompanhados exames em 52 pacientes durante 6 plantões (de segunda-feira à sábado). Como alguns exames foram "múltiplos", como abdome e pelve, ou dois segmentos da coluna, pode-se considerar que foram acompanhados 70 exames.

Os tempos de aquisição deste aparelho variaram entre 45" na segunda aquisição de um exame de crânio e seios da face e 6'09" em um exame de crânio. Os tempos totais variaram entre 3'53" em um exame de crânio e 25'58" em um exame de crânio e seios da face.

De todos os exames acompanhados nos TCs de 4 cortes, modelo no qual mais tempos de exames foram medidos, aproximadamente 97,9% eram de Crânio (35,9%), Abdome e Pelve (37,0%), Tórax (10,6%), Face (7,8%) e Coluna (6,6%). Por essa razão,

esses exames foram escolhidos para as simulações nos TCs de 4 cortes que diferenciavam os tipos de exames.

A média do tempo de aquisição do TC de 4 cortes foi 2'31" com um desvio padrão de 1'24", enquanto o tempo médio total ficou em 10'10" com um desvio padrão de 5'10". O tempo da etapa de aquisição do TC de 4 cortes ajustado à sua curva de distribuição de probabilidade foi uma curva lognormal de  $-1,33+L(3,11; 0,525)$  min.

### **TCs de 16 cortes**

As Tabelas 34 e 35 no Apêndice A apresentam os resultados para os TCs de 16 cortes.

Para o estudo dos tempos dos exames em aparelhos de 16 cortes foram utilizados três TC Toshiba Activion 16 (dois fabricados em 2013 e um em 2011), instalados em duas clínicas radiológicas, uma na cidade de Barbacena/MG e outra na cidade do Rio de Janeiro e em um hospital geral privado também na cidade do Rio de Janeiro. Na primeira unidade, foi acompanhado um exame, na segunda foram 12 exames em 6 pacientes e na última unidade, 3 exames. Na segunda clínica e no hospital, 5 pacientes receberam meio de contraste.

Os tempos de aquisição deste aparelho variaram entre 29" na segunda aquisição de um exame de crânio contrastado e 4'38" em um exame múltiplo, também com uso de contraste, de arco aórtico, carótidas e angiografia de crânio. Os tempos totais variaram entre 4'48" em um exame de crânio e 16'14" em um exame de abdome e pelve com contraste.

A média do tempo de aquisição dos TCs de 16 cortes ficou em 2'07" com um desvio padrão de 1'15", enquanto o tempo médio total ficou em 9'22" com um desvio padrão de 7'34". O tempo da etapa de aquisição dos TCs de 16 cortes ajustado à sua curva de distribuição de probabilidade foi uma curva lognormal de  $-2,76+L(4,38; 0,631)$  min.

### **TCs de 128 cortes**

Todos os resultados referentes ao TC de 128 cortes são encontrados na Tabela 36 no Apêndice A.

Para o estudo dos tempos dos exames em aparelhos de 128 cortes foi utilizado um TC Siemens Somatom 128 (ano 2014), instalado em uma clínica radiológica na cidade de Petrópolis, RJ. Foram acompanhados exames em 6 pacientes, sendo um múltiplo, logo, 7

exames. Neste aparelho não foi medido o tempo entre a chegada da guia e a entrada do paciente devido ao processo adotado na unidade.

Os tempos de aquisição deste aparelho variaram entre 20” na quarta aquisição de um exame de abdome e pelve contrastado e 1’53” em um de coluna dorsal. Já os tempos totais variaram entre 3’19” em um exame de seios da face e 17’27” em um exame de abdome e pelve com contraste.

A média do tempo de aquisição do TC de 128 cortes ficou em 50” com um desvio padrão de 32”, enquanto o tempo médio total ficou em 7’05” com um desvio padrão de 4’44”. O tempo da etapa de aquisição do TC de 128 cortes ajustado à sua curva de distribuição de probabilidade foi uma curva lognormal de  $0,179+L(0,598; 0,88)$  min.

### Produtividades Esperadas

Os resultados dos cálculos das produtividades são encontrados na Tabela 2. Nesta tabela, observa-se que a produtividade aumenta com o uso de tecnologias mais modernas. É importante observar o aumento da produtividade esperada quando se substitui um TC de 1 corte moderno (393 exames/mês) por outro de 128 cortes (703 exames/mês). Os resultados desta etapa foram publicados em SANTOS *et al.*, 2017. O texto integral pode ser encontrado no Apêndice C.

**Tabela 2:** Médias dos tempos medidos, totais dos exames realizados e produtividades semanais máximas calculadas para os TCs estudados.

Etapa	1 Corte (Todos)	1 Corte Moderno	2 Cortes	4 Cortes	16 Cortes	128 Cortes
<b>Chegada da Guia</b>	39”	34”	39”	1’27”	40”	NM
<b>Entrada do Paciente</b>	2’08”	1’45”	2’19”	1’20”	1’49”	53”
<b>Posicionamento do Paciente</b>	1’22”	1’16”	1’47”	1’20”	1’56”	1’38”
<b>Entrada de dados</b>	1’08”	1’08”	1’09”	1’33”	53”	40”
<b>Aquisição</b>	5’37”	3’27”	2’49”	2’31”	2’07”	50”
<b>Saída do Paciente</b>	2’01”	2’03”	2’44”	1’59”	1’58”	1’38”
<b>Total</b>	13’02”	10’04”	11’27”	10’12”	9’22”	5’38”
<b>Produtividade Máxima</b>	304	393	346	388	423	703

### 5.3. Simulações dos setores de TC

#### 5.3.1. Modelo inicial

Os resultados de produtividade do primeiro modelo criado com os dados dos exames no aparelho de 4 cortes mostraram-se semelhantes aos obtidos na prática pelo serviço estudado. A Tabela 3 apresenta os resultados mais relevantes obtidos na primeira simulação, como o tempo total de 29,07 min nos exames de tórax e o de 15,13 min nos exames de face. O operador estava em operação em 48,63% do tempo simulado e o local com maior tempo em uso foi o vestiário (36,86% do tempo). Os pacientes dos exames de abdome foram os que ficaram, percentualmente, mais tempo aguardando pelo atendimento (37,8% do tempo total). Deve-se observar a produtividade diária de 58 exames num período de trabalho de 12 horas.

**Tabela 3:** Resultados das simulações da seção 5.3.1.

Paciente/Exame	Número de Exames	Tempo Total (min)	Tempo em operação (min)
Tórax	5	29,07	10,42
Crânio	20	20,11	9,45
Abdome e Pelve	22	20,45	9,56
Coluna	5	18,81	11,45
Face	6	15,13	10,69

#### 5.3.2. Modelo para estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento

A Tabela 4 apresenta os tempos dos exames simulados para os três tipos de pacientes e os tempos médios ponderados nos oito cenários com as três tecnologias de TC escolhidas. Destaca-se o efeito da distribuição dos exames dos pacientes pelas 24 horas diárias. Os cenários com esta opção, 2, 4, 6 e 8, foram os que mais diminuíram os tempos de atendimento do paciente.

A adição de 1 vestiário ao modelo inicial também reduziu os tempos, como se comprova na Tabela 5 que traz a redução percentual dos tempos dos cenários simulados em relação ao cenário 1 (original).

**Tabela 4:** Resultados das simulações da seção 5.3.2. \*

	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>TCs de 1 Corte</b>								
<b>Agendado s/contraste</b>	21,16	16,35	19,35	15,71	14,99	13,11	13,19	11,73
<b>Emergência</b>	17,56	15,40	16,10	15,35	13,39	12,64	11,95	11,46
<b>Agendado c/contraste</b>	32,44	27,44	28,51	25,36	25,99	25,14	23,29	21,02
<b>Média Ponderada</b>	21,07	17,10	19,17	16,52	15,52	14,11	13,76	12,53
<b>TC de 4 Cortes</b>								
<b>Agendado s/contraste</b>	14,82	12,18	13,81	11,74	10,51	10,12	10,05	9,16
<b>Emergência</b>	12,48	11,44	12,17	11,75	9,74	9,57	9,25	9,50
<b>Agendado c/contraste</b>	23,72	19,68	20,47	18,06	18,77	18,64	16,73	16,20
<b>Média Ponderada</b>	14,91	12,66	13,91	12,36	11,05	10,76	10,43	9,95
<b>TC de 128 Cortes</b>								
<b>Agendado s/contraste</b>	11,30	10,01	11,32	9,79	9,30	8,53	8,39	8,14
<b>Emergência</b>	10,14	9,79	9,90	9,52	8,66	8,19	8,34	8,07
<b>Agendado c/contraste</b>	18,64	17,18	16,48	13,83	16,17	15,49	14,06	13,72
<b>Média Ponderada</b>	11,63	10,63	11,35	10,09	9,75	9,09	8,92	8,65

\*Tempos totais no processo de exame e suas médias ponderadas dos 3 tipos de pacientes estudados em TCs de 1, 4 e 128 cortes nos oito cenários simulados, em minutos decimais.

**Tabela 5:** Resultados das simulações da seção 5.3.2. \*

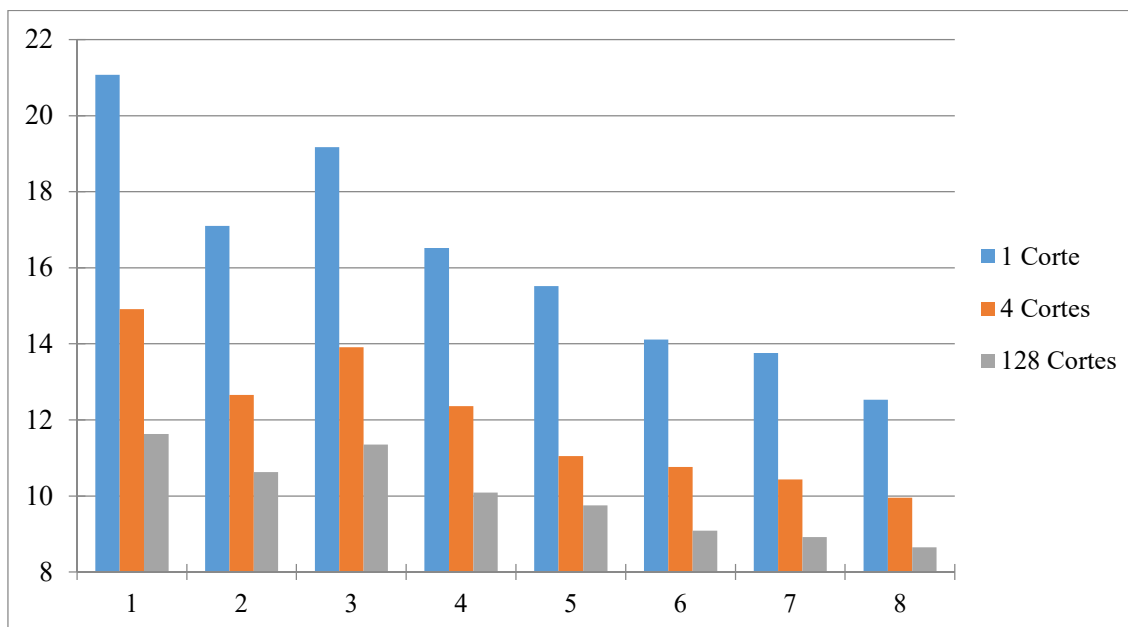
	Cenários						
	2	3	4	5	6	7	8
<b>1 Corte</b>	18,84%	9,02%	21,59%	26,34%	33,03%	34,69%	40,53%
<b>4 Cortes</b>	15,09%	6,71%	17,10%	25,89%	27,83%	30,05%	33,27%
<b>128 Cortes</b>	8,60%	2,41%	13,24%	16,17%	21,84%	23,30%	25,62%

\*Redução percentual em relação ao cenário 1 (original) dos tempos totais médios ponderados no processo de exame em TCs de 1, 4 e 128 cortes nos sete cenários alternativos simulados.

Somente adicionando o agendamento de todos os tipos de exames 24 horas por dia (Cenário 2), obteve-se uma diminuição dos tempos de atendimento da ordem de 18,84%, 15,09% e 8,60%, para os TCs de 1, 4 e 128 cortes, respectivamente. A adição de outro vestiário (Cenário 5) produziu uma redução de 26,34%, 25,89% e 16,17% nos tempos do cenário 1. Já a adição de um profissional de enfermagem ao cenário 1 (Cenário 3) produziu um efeito menor, diminuindo em 9,02%, 6,71% e 2,41% os tempos iniciais. Finalmente, aplicando-se todas as medidas propostas, agendamento de exames 24 horas, adição de 1 vestiário e contratação de um profissional de enfermagem, os tempos de

atendimentos diminuíram em 40,53%, 33,27% e 25,62%, respectivamente para as três tecnologias simuladas nessa etapa do estudo.

A Figura 11 apresenta um gráfico com os tempos médios ponderados para os três tipos de TCs estudados nos oito cenários simulados. Pode-se observar graficamente o efeito dos diversos cenários simulados nos tempos médios de cada tecnologia.



**Figura 11:** Representação gráfica dos tempos totais médios ponderados no processo de exame em TCs de 1, 4 e 128 cortes nos 8 cenários simulados.

### 5.3.3. Modelo para estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente

A Tabela 6 apresenta o número total de pacientes atendidos (por tipo de exame e total geral) nos dois cenários em três anos da simulação e a média mensal de exames.

**Tabela 6:** Número total de exames executados nos quatro cenários em três anos da simulação.

Tipo de Exame	Cenários 1 e 3	Cenários 2 e 4
Agendado sem contraste	4011	8136
Agendado com contraste	668	1357
Emergencial	1999	4058
<b>Total</b>	<b>6678</b>	<b>13551</b>
<b>Média Mensal</b>	<b>186</b>	<b>376</b>
<b>Média Diária</b>	<b>6</b>	<b>12</b>

Com uma média diária de 12 exames, mesmo os cenários 2 e 4 não produziram uma quantidade grande de exames para o período de simulação. Após os 3 anos de simulação,

os cenários 1 e 3 produziram uma média de 186 exames/mês e os cenários 2 e 4, um pouco mais que o dobro, 376 exames/mês.

A Tabela 7 apresenta a rentabilidade após 36 meses e o tempo para o retorno do investimento inicial nos quatro cenários simulados.

**Tabela 7:** Resultados das simulações da seção 5.3.3. \*

<b>Equipamento</b>	<b>Cenário</b>	<b>Tipo</b>	<b>Rentabilidade em 36 meses (em reais)</b>	<b>Tempo de retorno (em meses)</b>
<b>1 Corte</b>	<b>1</b>	<b>Novo / Usado</b>	-301.360,00 / -205.360,00	- / -
	<b>2</b>	<b>Novo / Usado</b>	890.995,00 / 987.095,00	24 / 22
	<b>3</b>	<b>Novo / Usado</b>	-355.360,00 / -259.360,00	- / -
	<b>4</b>	<b>Novo / Usado</b>	836.995,00 / 933.095,00	26 / 24
<b>2 Cortes</b>	<b>1</b>	<b>Novo / Usado</b>	-485.360,00 / -255.360,00	- / -
	<b>2</b>	<b>Novo / Usado</b>	741.095,00 / 936.855,00	26 / 23
	<b>3</b>	<b>Novo / Usado</b>	-539.360,00 / -309.360,00	- / -
	<b>4</b>	<b>Novo / Usado</b>	687.095,00 / 883.095,00	27 / 25
<b>4 Cortes</b>	<b>1</b>	<b>Novo / Usado</b>	-581.360,00 / -375.360,00	- / -
	<b>2</b>	<b>Novo / Usado</b>	611.095,00 / 817.095,00	29 / 25
	<b>3</b>	<b>Novo / Usado</b>	-635.360,00 / -429.360,00	- / -
	<b>4</b>	<b>Novo / Usado</b>	557.095,00 / 763.095,00	30 / 28
<b>16 Cortes</b>	<b>1</b>	<b>Novo / Usado</b>	-801.360,00 / -501.360,00	- / -
	<b>2</b>	<b>Novo / Usado</b>	367.095,00 / 667.095,00	32 / 28
	<b>3</b>	<b>Novo / Usado</b>	-855.360,00 / -555.360,00	- / -
	<b>4</b>	<b>Novo / Usado</b>	313.095,00 / 613.095,00	33 / 29
<b>128 Cortes</b>	<b>1</b>	<b>Novo / Usado</b>	- / -	- / -
	<b>2</b>	<b>Novo / Usado</b>	-432.835,00 / 67.165,00	- / 36
	<b>3</b>	<b>Novo / Usado</b>	- / -	- / -
	<b>4</b>	<b>Novo / Usado</b>	-486.835,00 / 13.165,00	- / 36

\*Rentabilidade (em reais) após 36 meses e o tempo (em meses) para o retorno do investimento (em meses) nas cinco tecnologias de TCs estudadas, para os 4 cenários simulados.

O cenário 1 apresenta uma condição de pouco crescimento da demanda de exames e sem necessidade de obra física na instalação. Deve-se observar que, mesmo na condição de menor investimento, com TC de 1 corte usado, o empreendimento não foi rentável em 3 anos.

No cenário 2, com maior crescimento da demanda de exames e sem necessidade de obra física na instalação, na condição de menor investimento, com TC de 1 corte usado,



o empreendimento se tornou rentável em 22 meses e ao final dos 3 anos acumulou um lucro líquido de R\$ 987.095,00.

O cenário 3 representa a condição mais crítica simulada, com pequeno crescimento da demanda de exames e com obras físicas. Nesse cenário, a opção pela aquisição de um TC de 16 cortes novo representou um prejuízo de R\$ 855.360,00 ao final dos 3 anos.

No cenário 4, com crescimento maior da demanda de exames, mas com necessidade de obras, pode-se ressaltar a dificuldade de quitação do investimento inicial nos aparelhos de 128 cortes, que mesmo optando-se por um modelo usado, obteve um lucro pequeno após os 3 anos, R\$ 13.165,00.

#### **5.3.4. Modelo com TC(s) de 4 cortes com diferentes estruturas para unidades com grande demanda de exames**

Para esse modelo, entre os exames agendados sem contraste e emergenciais, 34,6% eram exames de crânio, 34,3% de abdome e pelve, 10,4% de tórax, 12,1% de face e 8,5% de coluna. Entre os exames agendados contrastados, 43,6% eram de crânio, 43,2% de Abdome e Pelve e 13,1% de Tórax.

Como dito, foram simulados 6 cenários com diferentes estruturas organizacionais para oito demandas diversas:

1. 1 TC com 1 vestiário sem enfermagem;
2. 1 TC com 2 vestiários sem enfermagem;
3. 1 TC com 1 vestiário com enfermagem;
4. 1 TC com 2 vestiários com enfermagem;
5. 2 TCs com 4 vestiários sem enfermagem;
6. 2 TCs com 4 vestiários com enfermagem.

A Tabela 8 apresenta as oito taxas de chegadas dos três tipos de pacientes estudados e as estimativas diárias e totais de chegada de pacientes nas oito taxas simuladas.

**Tabela 8:** Taxas de chegadas simuladas no modelo da seção 5.3.4. \*

Taxa	Estimativa Diária	Agendados		Agendados c/contraste		Emergência	
		Diário	Total	Diário	Total	Diário	Total
1	15	N(8, 1)	8.766	3	4.383	N(4, 1)	7.305
2	27	N(15, 1)	18.993	4	5.844	N(8, 1)	13.149
3	51	N(29, 1)	42.369	6	8.766	N(16, 2)	18.993
4	103	N(58, 2)	87.660	N(12, 1)	14.610	N(33, 3)	42.369
5	154	N(87, 3)	131.489	N(18, 2)	20.454	N(49, 4)	64.283
6	206	N(116, 3)	173.858	N(24, 2)	29.220	N(66, 6)	86.198
7	257	N(145, 5)	222.070	N(30, 3)	35.064	N(82, 7)	108.114
8	309	N(174, 6)	265.900	N(36, 4)	40.908	N(99, 9)	128.567

\*Pacientes agendados sem e com contraste e emergenciais, estimativa do total de exames diários, nº de pacientes recebidos agendados sem e com contraste e emergenciais nas oito taxas de chegadas de pacientes simuladas.

As Tabelas 9 a 14 apresentam o número de pacientes atendidos e perdidos, a média mensal de exames executados e o percentual de exames perdidos, os tempos médios de exames dos três tipos de pacientes e a média ponderada destes, os tempos para retorno do investimento, o lucro após 4 anos, a taxa de ocupação do operador e o indicador Lucro/Tempo de exame no período simulado de 48 meses, para os cenários 1 a 6, respectivamente.

### **Cenário 1:** Modelo com 1 vestiário e sem enfermagem.

Pode-se observar, na Tabela 9, que as perdas de exames nas três primeiras taxas de chegadas de pacientes simuladas foram de 1,09%, 1,32% e 1,66%, respectivamente, porém, a partir da taxa 4 o percentual cresceu para 5,71%, chegando a 37,76% na taxa 6. Até a taxa de chegada 3, os tempos médios dos exames permaneceram sem grandes alterações, variando entre 13,38 min e 14,76 min, porém, a partir da taxa 4, o tempo médio ponderado passou a crescer, chegando a 56,96 min na taxa 6.

O tempo para o retorno do investimento diminui com o aumento dos pacientes atendidos. Na taxa 1, o retorno do investimento ocorreu após 410 dias, na taxa 2 em 172 dias, chegando a ocorrer em 30 dias na taxa 6. O lucro após 4 anos variou de R\$ 1.933.000,00 para a taxa 1 até R\$ 35.568.000,00 para a taxa 6.

A taxa 4 obteve 0,97 no índice Lucro/tempo de exame. A taxa de utilização do operador aumentou com o aumento do número de pacientes atendidos. Para a taxa 1, a

taxa de utilização do operador foi de 6,72% e na taxa 6, foi de 52,34% do tempo total de simulação.

**Tabela 9:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 1. \*

	<b>Taxas de Chegada</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	<b>Número de Exames</b>					
<b>Exames Perdidos</b>	222	503	1.163	8.261	51.551	109.237
<b>Pacientes Atendidos</b>	20.232	37.483	68.965	136.378	164.675	180.039
<b>Média mensal</b>	422	781	1.437	2.841	3.431	3.751
<b>Percentual de perdas</b>	1,09	1,32	1,66	5,71	23,84	37,76
	<b>Tempos de Exames</b>					
<b>Agendados</b>	10,80	11,75	13,33	27,02	49,76	58,58
<b>Agendados c/contraste</b>	18,54	19,43	20,69	33,81	59,67	64,30
<b>Emergência</b>	13,39	13,94	15,22	25,31	41,31	51,20
<b>Média Ponderada</b>	13,38	13,69	14,76	27,20	48,19	56,96
	<b>Rentabilidade</b>					
<b>Tempo para retorno</b>	410	172	83	41	34	30
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	1.933	5.560	12.189	26.366	32.331	35.568
<b>Ocupação do Operador</b>	6,72%	11,60%	20,61%	39,52%	47,07%	52,34%
<b>Lucro/tempo</b>	0,14	0,41	0,83	0,97	0,67	0,62

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Nas 6 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

## **Cenário 2:** Modelo com 2 vestiários e sem enfermagem.

A adição de 1 vestiário aumentou o investimento inicial em R\$ 2.000,00.

As perdas de exames nas quatro primeiras taxas de chegadas de pacientes simuladas foram de 0,86%, 1,10%, 1,03% e 1,63%, respectivamente, porém, a partir da taxa 5, o percentual cresceu, chegando à 18,28% na taxa 6. Até a taxa de chegada 4 os tempos médios dos exames cresceram pouco, variando entre 12,61 min e 16,77 min. A partir da taxa 5, o tempo médio passou a crescer, chegando a 45,49 min na taxa 6.

O retorno do investimento ocorreu após 410 dias na taxa 1, em 172 dias na taxa 2, e chegou a 20 dias na taxa 5. O lucro após 4 anos variou de R\$ 1.942.000,00 para a taxa 1 até R\$ 47.407.000,00 na taxa 6. A taxa 4 obteve 1,65 no índice Lucro/tempo de exame.

Para a taxa 1, a taxa de utilização do operador foi de 6,73% e, na taxa 6, foi de 68,61% do tempo total de simulação. Na taxa 4, o índice de utilização do operador alcançou 41,22% do tempo total.

**Tabela 10:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 2. \*

	<b>Taxas de Chegada</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
	<b>Número de Exames</b>					
<b>Exames Perdidos</b>	175	417	723	2.362	10.899	52.876
<b>Pacientes Atendidos</b>	20.279	37.569	69.405	142.277	205.327	236.400
<b>Média mensal</b>	422	783	1.446	2.964	4.278	4.925
<b>Percentual de perdas</b>	0,86	1,10	1,03	1,63	5,04	18,28
	<b>Tempos de Exames</b>					
<b>Agendados</b>	10,07	10,88	12,29	15,55	27,45	47,13
<b>Agendados c/contraste</b>	17,85	18,82	20,36	23,84	36,77	55,77
<b>Emergência</b>	12,50	13,01	14,59	16,87	25,00	38,69
<b>Média Ponderada</b>	12,61	12,84	13,92	16,77	27,60	45,49
	<b>Rentabilidade</b>					
<b>Tempo para retorno</b>	410	172	81	39	20	22
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	1.942	5.586	12.292	27.609	40.890	47.407
<b>Ocupação do Operador</b>	6,73%	11,63%	20,73%	41,22%	58,98%	68,61%
<b>Lucro/tempo</b>	0,15	0,44	0,88	1,65	1,48	1,04

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Nas 6 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

### Cenário 3: Modelo com 1 vestiário e 1 profissional de enfermagem.

O custo mensal fixo aumentou em R\$ 26.000,00 devido à contratação do profissional de enfermagem.

A Tabela 11 mostra que as perdas de exames nas quatro primeiras taxas de chegadas de pacientes simuladas foram de 1,07%, 1,21%, 1,42% e 3,63%, respectivamente. A partir da taxa 5, o percentual cresceu, chegando a 32,64% na taxa 6.

Até a taxa de chegada 3 os tempos médios dos exames não cresceram muito, variando entre 11,54 min e 12,81 min, porém, a partir da taxa 4, o tempo médio ponderado passou a crescer, chegando a 52,88 min na taxa 6.

**Tabela 11:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 3. \*

	Taxas de Chegada					
	1	2	3	4	5	6
	<b>Número de Exames</b>					
<b>Exames Perdidos</b>	219	458	998	5.252	38.392	94.413
<b>Pacientes Atendidos</b>	20.235	37.528	69.130	139.387	177.834	194.863
<b>Média mensal</b>	422	782	1.440	2.904	3.705	4.060
<b>Percentual de perdas</b>	1,07	1,21	1,42	3,63	17,76	32,64
	<b>Tempos de Exames</b>					
<b>Agendados</b>	9,03	9,91	11,27	20,39	44,22	54,71
<b>Agendados c/contraste</b>	16,73	17,85	18,93	27,82	54,48	61,69
<b>Emergência</b>	11,45	12,15	13,43	20,23	36,66	46,19
<b>Média Ponderada</b>	11,54	11,91	12,81	21,09	42,94	52,88
	<b>Rentabilidade</b>					
<b>Tempo para retorno</b>	771	218	88	41	32	27
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	710	4.349	11.008	25.780	33.873	37.503
<b>Ocupação do Operador</b>	3,65%	6,47%	11,66%	23,10%	29,26%	32,40%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	3,08%	5,15%	8,98%	17,31%	21,67%	24,32%
<b>Lucro/tempo</b>	0,06	0,37	0,86	1,22	0,79	0,71

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Nas 6 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

Na taxa 1, o retorno do investimento ocorreu após 710 dias, na taxa 2 em 218 dias, chegando a ocorrer em 27 dias na taxa 6. O lucro após 4 anos variou de R\$ 710.000,00 para a taxa 1 até R\$ 37.503.000,00 na taxa 6. A taxa 4 produziu o valor de 1,22 no índice Lucro/tempo de exame.

Para a taxa 1, a taxa de utilização do operador foi de 3,65% e na taxa 6 foi de 32,40% do tempo total de simulação. Para a enfermagem, as taxas de ocupação variaram de 3,08% na taxa 1 a 24,32% na taxa 6.

#### **Cenário 4:** Modelo com 2 vestiários e com 1 profissional de enfermagem.

Nesse cenário foram simuladas oito taxas de chegadas de pacientes.

A Tabela 11 mostra que as perdas de exames nas cinco primeiras taxas de chegadas de pacientes simuladas sempre estiveram próximas de 1%, porém, a partir da taxa 6 o percentual cresceu, chegando à 27,34% na taxa 8.

Até a taxa de chegada 4, os tempos médios dos exames não cresceram muito, variando entre 11,21 min e 12,95 min, porém, a partir da taxa 5 o tempo médio ponderado passou a crescer, chegando a 49,78 min na taxa 8.

Na taxa 1, o retorno do investimento ocorre após 772 dias, na taxa 2 em 218 dias, chegando a ocorrer em 17 dias na taxa 8. O lucro após 4 anos variou de R\$ 711.000,00 para a taxa 1 até R\$ 63.017.000,00 na taxa 8. A taxa 5 obteve 2,33 no índice Lucro/tempo de exame.

Para a taxa 1, a taxa de utilização do operador foi de 3,64% e na taxa 6 foi de 52,77% do tempo total de simulação. Para a enfermagem, as taxas de ocupação variaram de 3,08% na taxa 1 a 39,89% na taxa 8.

**Tabela 12:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 4. \*

	<b>Taxas de Chegada</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
	<b>Número de Exames</b>							
<b>Exames Perdidos</b>	194	393	712	1.824	2.005	20.455	57.432	119.041
<b>Pacientes Atendidos</b>	20.260	37.593	69.416	142.815	214.221	268.821	307.816	316.334
<b>Média mensal</b>	422	783	1.446	2.975	4.463	5.600	6.413	6.590
<b>Percentual de perdas</b>	0,95	1,03	1,02	1,26	0,93	7,07	15,72	27,34
	<b>Tempos de Exames</b>							
<b>Agendados</b>	9,67	9,17	9,77	11,46	16,50	29,64	43,21	52,29
<b>Agendados c/contraste</b>	17,35	17,18	18,05	20,01	25,66	37,82	50,62	55,46
<b>Emergência</b>	12,13	11,51	12,37	13,61	17,20	26,13	36,63	42,77
<b>Média Ponderada</b>	12,19	11,21	11,51	12,95	17,57	29,42	41,97	49,78
	<b>Rentabilidade</b>							
<b>Tempo para retorno</b>	772	218	88	40	25	20	18	17
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	711	4.359	11.061	26.519	40.922	53.052	54.821	63.017
<b>Ocupação do Operador</b>	3,64%	6,48%	11,71%	23,67%	34,83%	44,57%	45,75%	52,77%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	3,08%	5,15%	9,02%	17,72%	25,85%	33,38%	34,20%	39,89%
<b>Lucro/tempo</b>	0,06	0,39	0,96	2,05	2,33	1,80	1,31	1,27

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Nas 8 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

### **Cenário 5:** Modelo com 2 TCs, 4 vestiários e sem enfermagem.

A construção dos 4 vestiários adicionou R\$ 6.000,00 ao investimento inicial, enquanto o uso de 2 TCs adicionou R\$ 3.000,00 ao custo mensal fixo para custeio do contrato de manutenção desse segundo TC. Isso além do valor de aquisição do aparelho e da construção de uma nova sala. Nesse cenário foram simuladas as taxas 4, 5, 6 e 7.

As perdas de exames nas duas primeiras taxas de chegada de pacientes simuladas foram de 0,01% e 0,03%, respectivamente, porém, a partir da taxa 6 o percentual cresceu,

chegando à 21,92% na taxa 7. Para a taxa de chegadas 4 o tempo médio dos exames foi de 16,76 min, na taxa 5 foi de 28,60 min, 70,94 min na taxa 6 e 89,46 min na taxa 7.

Na taxa 4, o retorno do investimento ocorreu após 78 dias, na taxa 5 em 51 dias, chegando a ocorrer em 38 dias na taxa 7. O lucro após 4 anos variou de R\$ 27.211.000,00 para a taxa 4 até R\$ 56.765.000,00 na taxa 7.

**Tabela 13:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 5. \*

	<b>Taxas de Chegada</b>			
	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	<b>Número de Exames</b>			
<b>Exames Perdidos</b>	9	64	23.286	80.071
<b>Pacientes Atendidos</b>	144.630	216.164	265.990	285.177
<b>Média mensal</b>	3.013	4.503	5.541	5.941
<b>Percentual de perdas</b>	0,01	0,03	8,05	21,92
	<b>Tempos de Exames</b>			
<b>Agendados</b>	15,52	30,07	89,21	115,02
<b>Agendados c/contraste</b>	25,08	40,51	87,89	106,9
<b>Emergência</b>	16,44	21,82	28,34	31,31
<b>Média Ponderada</b>	16,76	28,60	70,94	89,46
	<b>Rentabilidade</b>			
<b>Tempo para retorno</b>	78	51	41	38
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	27.211	42.265	52.727	56.765
<b>Ocupação do Operador</b>	41,92%	62,10%	77,85%	84,64%
<b>Lucro/tempo</b>	1,62	1,48	0,74	0,63

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Nas 4 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

A taxa 4 obteve 1,62 no índice Lucro/tempo de exame. Para a taxa 4, a taxa de utilização do operador foi de 41,92% e na taxa 7 foi de 84,64% do tempo total de simulação.



**Cenário 6:** Modelo com 2 TCs, 4 vestiários e enfermagem.

Nesse cenário, foram simuladas as taxas 4, 5, 6, 7 e 8.

As perdas de exames nas cinco taxas de chegadas de pacientes simuladas foram de 0,02%, 0,07%, 0,10%, 0,39% e 2,64%. Até a taxa de chegada 5 os tempos médios dos exames não cresceram muito, variando entre 12,56 min e 14,84 min, porém, a partir da taxa 6 os tempos médios ponderados passaram a crescer, chegando a 40,13 min na taxa 8.

**Tabela 14:** Resultados das simulações da seção 5.3.4 no cenário 6. \*

	<b>Taxas de Chegada</b>				
	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	32	147	301	1.407	11.500
<b>Pacientes Atendidos</b>	144.607	216.081	288.975	363.841	423.875
<b>Média mensal</b>	3.013	4.502	6.020	7.580	8.831
<b>Percentual de perdas</b>	0,02	0,07	0,10	0,39	2,64
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	10,98	13,55	17,02	24,48	48,26
<b>Agendados c/contraste</b>	19,94	23,18	26,78	34,72	53,05
<b>Emergência</b>	13,27	14,83	15,53	17,18	19,21
<b>Média Ponderada</b>	12,56	14,84	17,56	23,30	40,13
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	80	51	39	29	25
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	25.967	41.029	56.376	72.121	84.751
<b>Ocupação do Operador</b>	23,96%	35,64%	47,88%	60,07%	69,96%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	17,93%	26,44%	35,85%	44,71%	52,05%
<b>Lucro/tempo</b>	2,07	2,76	3,21	3,10	2,11

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Nas 5 taxas de chegada simuladas para 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 4 cortes.

Na taxa 4, o retorno do investimento ocorreu após 80 dias, na taxa 5 em 51 dias, chegando a ocorrer em 25 dias na taxa 8. O lucro após 4 anos variou de R\$ 25.967.000,00 para a taxa 4 até R\$ 84.751.000,00 na taxa 8. A taxa 6 obteve 3,21 no índice Lucro/tempo de exame. Para a taxa 4, a taxa de utilização do operador foi de 23,96% e na taxa 8 foi de 69,96% do tempo total de simulação. Para a enfermagem, as taxas de ocupação variaram de 17,93% na taxa 4 a 52,05% na taxa 8.

### 5.3.5. Modelo com TC(s) das cinco tecnologias estudadas com diferentes estruturas para unidades com grande demanda por exames

A distribuição entre os tipos de exames seguiu os mesmos valores do item 5.3.4. Como dito, foram criados 6 cenários com as seguintes características:

1. 1 TC com 1 vestiário sem enfermagem com a taxa de chegada 1;
2. 1 TC com 2 vestiários sem enfermagem com a taxa de chegada 1;
3. 1 TC com 1 vestiário com enfermagem com a taxa de chegada 1;
4. 1 TC com 2 vestiários com enfermagem com a taxa de chegada 2;
5. 2 TCs com 4 vestiários sem enfermagem com a taxa de chegada 1;
6. 2 TCs com 4 vestiários com enfermagem com a taxa de chegada 3.

A Tabela 15 apresenta as três taxas de chegadas dos três tipos de pacientes estudados e as estimativas diárias e totais de chegada de pacientes nas três taxas simuladas.

**Tabela 15:** Taxas de chegadas simuladas no modelo da seção 5.3.5. \*

Taxa	Estimativa Diária	Agendados		Agendados c/contraste		Emergência	
		Diário	Total	Diário	Total	Diário	Total
1	103	N(58, 2)	87.660	N(12, 1)	14.610	N(33, 3)	42.369
2	154	N(87, 3)	131.489	N(18, 2)	20.454	N(49, 4)	64.283
3	206	N(116, 3)	173.858	N(24, 2)	29.220	N(66, 6)	86.198

\*Taxas de chegadas simuladas para pacientes agendados sem e com contraste e emergenciais, estimativa do total de exames diários, nº de pacientes recebidos para exames agendados sem e com contraste e emergenciais nas oito taxas de chegadas de pacientes simuladas.

As Tabelas 16 a 21 apresentam o número de pacientes atendidos e perdidos, a média mensal de exames executados e o percentual de exames perdidos, os tempos médios de exames dos três tipos de pacientes e a média ponderada destes, os tempos para retorno do

investimento, o lucro após 4 anos, a taxa de ocupação do operador e o indicador Lucro/Tempo de exame no período simulado de 48 meses, para os cenários 1 a 6, respectivamente.

**Cenário 1:** Modelo com 1 TC, 1 vestiário, sem enfermagem e taxa de chegadas número 1.

Na Tabela 16, observa-se que as perdas de exames nos TCs de 2 cortes foram de 11,23%, caindo para 5,63% nos TCs de 4 cortes, e chegando a 3,69% nos TCs de 128 cortes. Os TCs de 2 cortes produziram um tempo médio de exames de 36,94 min, os de 4 cortes, 27,88 min, os de 16 cortes, 26,47 min e os TCs de 128 cortes 20,36 min.

**Tabela 16:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 1. \*

	Tipo de TC				
	1 corte	2 cortes	4 cortes	16 cortes	128 cortes
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	-	16.237	8.138	7.724	5.331
<b>Pacientes Atendidos</b>	-	128.402	136.501	136.915	139.308
<b>Média mensal</b>	-	2.675	2.844	2.852	2.902
<b>Percentual de perdas</b>	-	11,23	5,63	5,34	3,69
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	-	37,35	27,73	26,11	19,74
<b>Agendados c/contraste</b>	-	45,32	35,00	33,68	26,05
<b>Emergência</b>	-	33,21	25,72	24,72	19,67
<b>Média Ponderada</b>	-	36,94	27,88	26,47	20,36
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	-	29	39	51	86
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	-	24.926	26.417	26.323	26.079
<b>Ocupação do Operador</b>	-	47,05%	40,05%	38,72%	32,11%
<b>Lucro/tempo</b>	-	0,67	0,95	0,99	1,28

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor de tomografia com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes.

Os TCs de 2 cortes obtiveram um lucro de R\$ 24.926.000,00 após 4 anos, enquanto os de 4 cortes produziram um lucro de R\$ 26.417.000,00. O retorno do investimento nos TCs de 2 cortes ocorreu em 29 dias, nos de 4 cortes em 39 dias, nos de 16 cortes em 51 dias e nos TCs de 128 cortes em 86 dias.

O TC de 128 cortes obteve para o indicador Lucro/Tempo o valor de 1,28. A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, diminuindo de 47,05% do tempo nos equipamentos de 2 cortes para 32,11% nos de 128 cortes.

**Cenário 2:** Modelo com 1 TC, 2 vestiários, sem enfermagem e com a taxa de chegadas número 1.

Nesse cenário, as cinco tecnologias de TC estudadas foram simuladas.

Na Tabela 17 observa-se que as perdas de exames nos TC de 1 corte foram de 4,33%, caindo para 1,76% nos aparelhos de 4 cortes, e chegando a 1,35% nos TC de 128 cortes.

Os TC de 1 corte produziram um tempo médio de exames de 30,11 min, os de 2 cortes, 29,38 min, os de 4 cortes, 16,70 min, os de 16 cortes, 16,23 min e os TCs de 128 cortes 13,70 min.

Os TC de 128 cortes obtiveram um lucro de R\$ 26.774.000,00 após 4 anos, enquanto os de 4 cortes produziram R\$ 27.548.000,00. Nesse cenário, o retorno do investimento nos TC de 1 corte ocorreu em 19 dias, nos de 2 cortes em 29 dias, nos de 4 cortes em 39 dias, nos de 16 cortes em 49 dias e nos TC de 128 cortes em 85 dias.

O TC de 128 cortes obteve para o indicador Lucro/Tempo o valor de 1,95. A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, diminuindo de 59,81% do tempo nos equipamentos de 1 corte para 32,90% nos de 128 cortes.

**Tabela 17:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 2. \*

	<b>Tipo de TC</b>				
	<b>1 corte</b>	<b>2 cortes</b>	<b>4 cortes</b>	<b>16 cortes</b>	<b>128 cortes</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	6.270	3.904	2.551	2.076	1.958
<b>Pacientes Atendidos</b>	138.369	140.735	142.088	142.563	142.681
<b>Média mensal</b>	2.883	2.932	2.960	2.970	2.973
<b>Percentual de perdas</b>	4,33	2,70	1,76	1,44	1,35
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	29,43	28,13	15,44	14,98	12,44
<b>Agendados c/contraste</b>	40,71	38,79	24,07	23,37	19,62
<b>Emergência</b>	27,87	28,72	16,76	16,34	14,26
<b>Média Ponderada</b>	30,11	29,38	16,70	16,23	13,70
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	19	26	39	49	85
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	27.243	27.540	27.548	27.440	26.774
<b>Ocupação do Operador</b>	59,81%	51,58%	41,64%	40,35%	32,90%
<b>Lucro/tempo</b>	0,90	0,94	1,65	1,69	1,95

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes no cenário 2.

### **Cenário 3:** Modelo com 1 TC, 1 vestiário, enfermagem e com a taxa de chegadas

1.

Na Tabela 18, observa-se que as perdas de exames nos TCs de 1 corte foram de 12,37%, caindo para 3,54% nos aparelhos de 4 cortes, e chegando a 2,34% nos TCs de 128 cortes.

Os TC de 1 corte produziram um tempo médio de exames de 38,42 min, os de 2 cortes, 30,24 min, os de 4 cortes, 21,53 min, os de 16 cortes, 20,44 min e os TC de 128 cortes 15,78 min. Os TC de 1 corte produziram um lucro de R\$ 23.507.000,00 após 4 anos, enquanto os de 4 cortes geraram R\$ 25.788.000,00.

**Tabela 18:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 3. \*

	<b>Tipo de TC</b>				
	<b>1 corte</b>	<b>2 cortes</b>	<b>4 cortes</b>	<b>16 cortes</b>	<b>128 cortes</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	17.899	10.683	5.117	5.006	3.388
<b>Pacientes Atendidos</b>	126.740	133.956	139.522	139.633	141.251
<b>Média mensal</b>	2.640	2.791	2.907	2.909	2.943
<b>Percentual de perdas</b>	12,37	7,39	3,54	3,46	2,34
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	38,81	30,03	20,80	19,69	14,81
<b>Agendados c/contraste</b>	48,78	39,01	28,81	27,54	21,34
<b>Emergência</b>	34,04	27,64	20,52	19,53	15,86
<b>Média Ponderada</b>	38,42	30,24	21,53	20,44	15,78
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	21	27	40	51	87
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	23.507	24.879	25.788	25.611	25.296
<b>Ocupação do Operador</b>	39,06%	32,45%	23,57%	22,23%	15,00%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	15,74%	16,65%	17,35%	17,32%	17,53%
<b>Lucro/tempo</b>	0,61	0,82	1,20	1,25	1,60

\*Número de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes no cenário 3.

O retorno do investimento nos TC de 1 corte ocorreu em 21 dias, nos de 2 cortes em 27 dias, nos de 4 cortes em 40 dias, nos de 16 cortes em 51 dias e nos TC de 128 cortes em 87 dias.

Os TC de 128 cortes obtiveram para o indicador Lucro/Tempo o valor de 1,60. A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, de 39,06% do tempo nos equipamentos de 1 corte para 15,00% nos de 128 cortes. A ocupação da enfermagem aumentou de 15,74% nos TC de 1 corte até 17,53% nos de 128 cortes.

**Cenário 4:** Cenário com 1 TC, 2 vestiários, enfermagem e com a taxa de chegadas

5.

Na Tabela 19, observa-se que as perdas de exames nos TC de 1 corte foram de 12,55%, caindo para 5,83% nos de 2 cortes, para 2,49% nos de 4 cortes, e chegando a 1,79% nos TCs de 128 cortes. Nesse cenário, os TC de 1 corte produziram um tempo médio de exames de 40,82 min, os de 2 cortes, 28,29 min, os de 4 cortes, 17,77 min, os de 16 cortes, 17,12 min e os TC de 128 cortes 13,87 min.

**Tabela 19:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 4. \*

	<b>Tipo de TC</b>				
	<b>1 corte</b>	<b>2 cortes</b>	<b>4 cortes</b>	<b>16 cortes</b>	<b>128 cortes</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	27.140	12.611	5.392	4.449	3.876
<b>Pacientes Atendidos</b>	189.088	203.617	210.836	211.779	212.352
<b>Média mensal</b>	3.939	4.242	4.392	4.412	4.424
<b>Percentual de perdas</b>	12,55	5,83	2,49	2,06	1,79
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	41,33	27,88	16,71	16,07	12,7
<b>Agendados c/contraste</b>	55,26	39,74	26,30	25,23	20,43
<b>Emergência</b>	35,19	25,47	17,22	16,70	14,17
<b>Média Ponderada</b>	40,82	28,29	17,77	17,12	13,87
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	14	18	24	34	56
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	36.690	39.653	40.879	40.842	40.233
<b>Ocupação do Operador</b>	57,75%	48,96%	35,45%	33,47%	22,50%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	23,08%	24,96%	25,83%	25,95%	25,98%
<b>Lucro/tempo</b>	0,90	1,40	2,30	2,39	2,90

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes.

Os TC de 1 corte obtiveram um lucro de R\$ 36.690.000,00 após 4 anos, enquanto os de 4 cortes alcançaram R\$ 40.879.000,00.

O retorno do investimento nos TC de 1 corte ocorreu em 14 dias, nos de 2 cortes em 18 dias, nos de 4 cortes em 24 dias, nos de 16 cortes em 34 dias e nos TC de 128 cortes em 56 dias.

Os TC de 128 cortes obtiveram para o indicador Lucro/Tempo o valor de 2,90.

A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, de 57,75% do tempo nos equipamentos de 1 corte para 22,50% nos de 128 cortes. A ocupação da enfermagem aumentou de 23,08% nos TCs de 1 corte até 25,98% nos de 128 cortes.

**Cenário 5:** Cenário com 2 TCs, 4 vestiários, sem enfermagem e com a taxa de chegadas 1.

Na Tabela 20, observa-se que somente com TC de 1 corte ocorreram perdas de pacientes, mesmo assim, 3 em 4 anos.

Os TC de 1 corte produziram um tempo médio de exames de 34,44 min, os de 2 cortes, 24,14 min, os de 4 cortes, 17,09 min, os de 16 cortes, 16,38 min e os TCs de 128 cortes 13,43 min.

Os TC de 1 corte obtiveram um lucro de R\$ 27.947.000,00 após 4 anos, enquanto os de 128 cortes alcançaram R\$ 25.416.000,00.

Nesse cenário, o retorno do investimento nos TC de 1 corte ocorreu em 39 dias, nos de 2 cortes em 54 dias, nos de 4 cortes em 77 dias, nos de 16 cortes em 100 dias e nos TC de 128 cortes em 170 dias.

Os TC de 128 cortes obtiveram o valor de 1,89 para o indicador Lucro/Tempo.

A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, de 62,44% do tempo nos equipamentos de 1 corte para 33,36% nos de 128 cortes.



**Tabela 20:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 5. \*

	<b>Tipo de TC</b>				
	<b>1 corte</b>	<b>2 cortes</b>	<b>4 cortes</b>	<b>16 cortes</b>	<b>128 cortes</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	3	0	0	0	0
<b>Pacientes Atendidos</b>	144.636	144.639	144.639	144.639	144.639
<b>Média mensal</b>	3.013	3.013	3.013	3.013	3.013
<b>Percentual de perdas</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	35,62	23,48	15,85	15,07	12,11
<b>Agendados c/contraste</b>	47,37	35,65	25,93	25,10	19,95
<b>Emergência</b>	27,54	21,54	16,61	16,08	13,92
<b>Média Ponderada</b>	34,44	24,14	17,09	16,38	13,43
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	39	54	77	100	170
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	27.947	27.664	27.275	26.807	25.416
<b>Ocupação do Operador</b>	62,44%	53,03%	42,40%	40,95%	33,36%
<b>Lucro/tempo</b>	0,81	1,15	1,60	1,64	1,89

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes.

**Cenário 6:** Cenário com 2 TCs, 2 vestiários, enfermagem e com a taxa de chegadas 3.

Na Tabela 21, observa-se que as perdas de exames nos TC de 1 corte foram de 8,44%, caindo para 0,60% nos aparelhos de 2 cortes, e chegando a 0,01% nos TC de 128 cortes. Os TC de 1 corte produziram um tempo médio de exames de 66,76 min, os de 2 cortes, 30,58 min, os de 4 cortes, 17,84 min, os de 16 cortes, 17,51 min e os TC de 128 cortes 13,44 min.

O lucro após 4 anos nos TCs de 1 corte foi de R\$ 52.099.000,00, R\$ 56.546.000,00 nos de 2 cortes, R\$ 56.344.000,00 nos de 4 cortes, R\$ 55.949.000,00 nos de 16 cortes e

R\$ 54.675.000,00 nos de 128 cortes. O investimento inicial foi amortizado em 20 dias nos TC de 1 corte, em 25 nos de 2 cortes, em 38 nos de 4 cortes, 49 nos de 16 cortes e 84 dias nos TC de 128 cortes.

Os TC de 128 cortes obtiveram um resultado de 4,07 para o indicador Lucro/Tempo.

A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, de 82,20% do tempo nos equipamentos de 1 corte para 30,75% nos de 128 cortes. A ocupação da enfermagem aumentou de 33,30% nos TC de 1 corte até 35,86% nos de 128 cortes.

**Tabela 21:** Resultados das simulações da seção 5.3.5 no cenário 6. \*

	<b>Tipo de TC</b>				
	<b>1 corte</b>	<b>2 cortes</b>	<b>4 cortes</b>	<b>16 cortes</b>	<b>128 cortes</b>
	<b>Número de Exames</b>				
<b>Exames Perdidos</b>	24.423	1.750	301	238	39
<b>Pacientes Atendidos</b>	264.853	287.526	288.975	289.038	289.237
<b>Média mensal</b>	5.518	5.990	6.020	6.022	6.026
<b>Percentual de perdas</b>	8,44	0,60	0,10	0,08	0,01
	<b>Tempos de Exames</b>				
<b>Agendados</b>	79,56	32,33	17,24	16,94	14,31
<b>Agendados c/contraste</b>	102,98	50,61	27,69	26,72	22,33
<b>Emergência</b>	28,68	20,25	15,71	15,53	14,33
<b>Média Ponderada</b>	66,76	30,58	17,84	17,51	13,44
	<b>Rentabilidade</b>				
<b>Tempo para retorno</b>	20	25	38	49	84
<b>Lucro 4 anos (R\$ 1.000,00)</b>	52.099	56.546	56.344	55.949	54.675
<b>Ocupação do Operador</b>	82,20%	69,73%	48,82%	45,99%	30,75%
<b>Ocupação da Enfermagem</b>	33,30%	35,67%	35,87%	35,89%	35,86%
<b>Lucro/tempo</b>	0,78	1,55	3,16	3,20	4,07

\*Nº de pacientes recebidos, agendados sem e com contraste e de emergência, pacientes perdidos e atendidos, média mensal e percentual de perda de exames. Tempo dos exames agendados sem e com contraste, de emergência e a média ponderada destes (em minutos decimais). Tempo para o retorno do investimento (em dias), lucro após 4 anos (em milhares de Reais), ocupação do operador e da enfermagem e indicador lucro/tempo de exame. Dados referentes a 4 anos de funcionamento de um setor com um TC de 1, 2, 4, 16 e 128 cortes.

## 6. DISCUSSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a produtividade de diferentes tecnologias de tomógrafos computadorizados, em setores com diferentes estruturas organizacionais, utilizando simulação por eventos discretos. Para isso, foi preciso conhecer o mercado de TC novos, o funcionamento dos setores de TC e como se comportam diferentes tipos de TC.

Fez-se necessário também entender a maneira como pensam os profissionais envolvidos nos setores de TC no momento da aquisição de um aparelho desses.

Para entender melhor o mercado de TCs novos, foi feita uma pesquisa na internet para determinar os principais fabricantes e, nos sites destes, pesquisados os modelos de tecnologia mais simples oferecidos em cada mercado.

### 6.1. Pesquisas preliminares

#### **Pesquisa com os profissionais envolvidos com TC**

Com relação à pesquisa de opinião sobre a especificação dos TCs, é interessante comparar os pontos de vista dos entrevistados no Brasil e no exterior, a importância dada à dose de radiação e capacidade diagnóstica para os estrangeiros em contraposição à opinião dos brasileiros superestimando os custos operacionais. Essa é uma posição perigosa que parece denotar uma maior importância para o lucro do que com a qualidade do atendimento ao paciente. Ainda no Brasil, destaca-se que no entendimento dos entrevistados, uma das principais consequências da substituição de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos seria o aumento da produtividade, o que realmente pode ocorrer, mas, como visto na seção 5.1.6, este aumento depende de outros fatores e não é proporcional ao aumento de cortes dos TCs.

A maior importância com dose e qualidade de imagem dada pelos entrevistados estrangeiros pode ser produto de legislações mais rígidas.

Deve-se observar que, no Brasil, a maioria dos entrevistados atuavam em entidades privadas, ao contrário dos entrevistados estrangeiros. Esse viés pode explicar as preferências acima discutidas.

## **O mercado mundial de TC**

Em diversos países, TCs de 1 corte ainda permanecem em uso. No Brasil, em 2014, um estudo no estado do Rio de Janeiro com 56 TCs identificou que 21% eram de 2 cortes, e outros 21% eram de 1 corte (TRAVASSOS, 2015). Na pesquisa nos sites dos fabricantes, a maioria dos TC “de entrada” eram de 2 a 16 cortes, e aparelhos de 1 corte estavam disponíveis somente na Ásia (GE, HITACHI, NEUSOFT, PHILIPS, SHIMADZU, SIEMENS, TOSHIBA, 2016).

Em 2013, no Brasil, um TC de 1 corte novo custava aproximadamente R\$ 300.000,00; um de 2 cortes, R\$ 400.000,00; um de 4 cortes, R\$ 580.000,00; um de 16 cortes, R\$ 750.000,00 e; e os de 128 cortes, R\$ 1.500.000,00. No entanto, como mencionado, para a maioria dos exames, mesmo modelos de 1 corte podem ser adequados (JIANG, 2009), e a produtividade necessária para cidades ou unidades pequenas também pode ser alcançada com modelos mais simples. Do ponto de vista do custo/benefício, pode-se inferir que a aquisição de três TCs, sendo um TC de 1 corte e dois de 4 cortes (total de R\$ 1.460.000,00 pelos valores acima citados), poderia produzir muito mais exames do que adquirindo-se um de 128 cortes, conforme a Tabela 1.

Como visto os modelos menos sofisticados e, logo, mais acessíveis, aos poucos estão deixando de ser fabricados e tornando mais caro o acesso a essas tecnologias. Além do problema do custo de aquisição, os TCs mais sofisticados costumam ter manutenções mais complexas e caras, o que se torna um problema mais grave quando se consideram unidades localizadas longe dos grandes centros urbanos. Por exemplo, um estudo de 2011 identificou que 85% dos 52 hospitais africanos estudados tiveram problemas em encontrar profissionais locais qualificados para reparar esses dispositivos (GUERMAZI, 2012). A maioria dos países africanos carece de escritórios do fabricante e, portanto, suas demandas precisam ser atendidas por escritórios na Europa ou por pessoal não treinado local (KACHIENG’A, 2002, MARANGA, 2012, FMOH, 2011).

### ***Plataformas compartilháveis***

Apesar de fugir ao tema central deste estudo, após a análise da oferta dos TCs pelo mundo e entendendo que muitos serviços de saúde necessitam de aparelhos desses, mas não possuem recursos para aquisição de modelos mais sofisticados, formulou-se uma proposta que pode minimizar o problema.

A adoção de plataformas modulares compartilháveis é comum na indústria automotiva, com plataformas utilizadas por muitos modelos de carros permitindo o

intercâmbio de componentes e gerando economia de escala. Adaptando o método dos automóveis para os tomógrafos, essas plataformas compartilhariam partes dos TC, como chassis, motores, cabeamento, mesa de exames, console, gerador de alta tensão, tubo de raios X, placas de controle de mesa de exames/gantry e sistemas de comunicação rotacional/estacionária de gantry. Esse tipo de TC poderia ser incluído em programas como o WHIS-RAD da OMS, que desenvolveu sistemas simples de raios X direcionados às necessidades dos países em desenvolvimento (WHO, 1995).

As diferenças construtivas entre as tecnologias single e multi slice diversas podem ser resumidas como:

a) Detectores: os modelos *Multi-slice* apresentam linhas de detectores que determinam o número de cortes simultâneos (no modelo de 1 corte há apenas uma linha);

b) Aquisição: mais cortes requerem maior capacidade de integração de dados e mais placas eletrônicas;

c) Colimação (define a espessura do corte): “Fan Beam” em TCs de 1 corte são substituídos por “Cone Beam” em modelos com múltiplas cortes;

d) Comunicação: com o aumento do fluxo de dados, a velocidade de transmissão deve aumentar com o número de cortes;

e) Projeto físico: O chassi (gantry e console) nos modelos *Multi-slice* é maior do que nos modelos de 1 corte, pois eles abrigam mais peças;

f) Armazenamento e reconstrução de imagens: Aumentar o número de cortes aumenta as necessidades de processamento de dados, exigindo, portanto, mais poder computacional (JIANG, 2009).

Dessa forma, uma plataforma capaz de suportar um sistema de 32 cortes, por exemplo, poderia receber um detector com apenas uma linha de detectores, colimadores, placas, software e discos rígidos (funcionando como um sistema de 1 corte). No entanto, quando necessário, o proprietário poderia solicitar a adição/substituição das peças necessárias para uma atualização para um sistema de 4 até 32 cortes. Essas mudanças não exigiriam a substituição de peças grandes, como o gantry ou a mesa de exames, nem uma nova instalação física, e essa abordagem reduziria muito os custos de transporte e mão-de-obra e o tempo de inatividade do equipamento. Assim, TCs mais baratos seriam disponibilizados para mercados que carecem de mais recursos. Atualmente, já existem equipamentos *upgradeables* (como 16 para 32 cortes), mas não há opções para ampliação de modelos mais simples. Do ponto de vista do marketing, o fornecimento de tal escalabilidade teria a vantagem de gerar fidelidade à marca.

Apesar de não se ligar diretamente ao objetivo central desta tese, a simulação do funcionamento de setores de TC, essa etapa da pesquisa permitiu observar que ações de âmbito global poderiam permitir uma maior disseminação da tecnologia de tomografia computadorizada.

## **6.2. Definição das etapas de exames**

Para que fosse possível a criação de modelos de processos, e a simulação do funcionamento dos setores de TC, foi necessário conhecer os processos físicos de execução de tais exames. Como dito, após a análise do processo de obtenção do exame de TC, esse foi dividido em seis etapas e essas etapas tiveram os seus tempos medidos. Boland *et al.*, 2008, dividiram o processo de obtenção do exame de TC em 35 etapas, sendo 10 posteriores à saída do paciente e 25 contidas nas 6 etapas propostas neste trabalho.

A primeira etapa se refere ao tempo de atendimento do paciente após a chegada da guia de exame na mesa do operador. Essa etapa pode ser longa se o operador estiver ocupado quando a guia chegar, se este não atender com prontidão, se o paciente não estiver na sala de espera, se o paciente precisar de transporte e esse demorar, entre outras causas nada relacionadas com a tecnologia do tomógrafo.

A etapa dois refere-se ao tempo gasto para o paciente ser preparado para fazer o exame, assim, dependendo das condições físicas do paciente, esta etapa pode se alongar. A etapa três refere-se ao tempo de posicionamento do paciente no TC para a realização do exame. Esta etapa relaciona-se tanto com as condições do paciente, que podem dificultar o posicionamento ou a imobilização, quanto com a operação da mesa de exame, que pode ser mais ou menos rápida e/ou intuitiva.

As etapas quatro e cinco referem-se diretamente ao aparelho, representando, respectivamente, o tempo para a inserção de dados no computador do TC e o tempo para a execução do exame propriamente dito.

A última etapa se assemelha a segunda, já que se refere ao processo de saída do paciente.

Para equipamentos de alta velocidade (mais de 32 cortes), a etapa cinco poderia ser dividida em duas, "exame" e "reconstrução", pois, como esses são muito rápidos, alguns operadores (por decisão própria) aguardam o término da apresentação destas antes de retirar o paciente da mesa de exames. Isso aumenta o tempo de aquisição medido.

Protocolos com interpolação que gere muitas imagens tornam as reconstruções demoradas e devem ser cuidadosamente ajustados. Por outro lado, aparelhos tecnologicamente mais antigos, normalmente, possuem menor capacidade computacional, o que também torna as reconstruções mais demoradas. Isso não se refere a produzir mais ou menos cortes e sim à capacidade/velocidade do computador do TC.

Como a maioria dos exames de abdome e pelve são feitos ao mesmo tempo, o modelo foi construído como exame de “Abdome e Pelve”, também chamados nas unidades de saúde de “Abdome Total”.

A partir dos valores médios, máximos e mínimos calculados a partir dos tempos medidos, podem-se utilizar métodos heurísticos, para inferir resultados esperados (médios), ideais (mínimos) e a produtividade mínima (máximos), por exemplo.

## **6.2.1. Medidas dos tempos das etapas e dificuldades encontradas**

### **6.2.1.1. Aparelhos de 1 corte**

No primeiro TC de 1 corte estudado, a unidade evitava fazer alguns exames por conta de limitações do aparelho. No primeiro exame de coluna, ocorreu um problema de alta tensão e, no segundo, o paciente não havia feito “preparo” para o exame, o que dificultou a sua realização pela baixa qualidade de imagem obtida. Nas duas ocasiões, a emissão de radiação foi interrompida e o operador recomeçou a aquisição das imagens, gerando nova exposição. O operador teve dificuldades em contornar os problemas, o que pode denotar falta de treinamento. Devem-se ressaltar os longos tempos da etapa “aquisição” em 2 exames de coluna lombar. No exame, de crânio, pode-se ressaltar a grande demora na etapa “entrada do paciente”, quando este troca de roupa e se desloca até o TC para então ser posicionado. É importante lembrar que em exames de crânio não é necessária a troca de roupa, somente a retirada de adornos na região a ser examinada. Os resultados dos tempos medidos mostram o quanto o tempo de aquisição pode ou não afetar o tempo total do exame. Observando-se os tempos de aquisição e total do exame de crânio e de dois dos exames de coluna, nota-se que mesmo com uma aquisição muito mais rápida, o exame de crânio foi mais demorado que esses dois exames, sendo mais rápido somente que o exame de coluna onde ocorreram problemas.

Observa-se uma grande diferença entre o tempo obtido no exame de crânio feito no segundo TC estudado e o feito no primeiro aparelho. Isso pode ser um indicador da diferença tecnológica, apesar de ambos serem TCs de 1 corte.

No terceiro TC de 1 corte estudado, o tempo total do exame de coluna lombar foi menos que a metade do tempo médio dos exames acompanhados no primeiro aparelho. A demora na entrada do paciente de crânio, enviesou o tempo total. Essa demora corrobora a tese de que as etapas não relacionadas com a aquisição da imagem devem receber especial atenção para que se possa aumentar a produtividade das unidades (SANTOS *et al.*, 2014). O curto tempo na etapa de “entrada de dados” é consequência do operador ter inserido os dados antes da entrada do paciente. Esse procedimento diminui o tempo total dos exames, porém só é possível quando o paciente demora para chegar na sala após a chegada da guia de exame ou quando existem outros profissionais responsáveis por guiar o paciente, por exemplo.

No último TC de 1 corte estudado os tempos permaneceram dentro da faixa dos outros dois aparelhos de modelo semelhante. Os tempos médios de aquisição e total para esses aparelhos podem ser considerados muito bons, principalmente se comparados com os resultados de equipamentos mais sofisticados.

Pode-se observar que nos exames de crânio, mesmo em aparelhos mais básicos, as etapas independentes da aquisição são importantes, haja vista que a entrada e a saída do paciente consumiram mais de 50% do tempo total do exame.

Comparando-se os resultados do modelo de um corte antigo e seus similares modernos, observa-se que estes apresentaram tempos de aquisição bastante diferentes. Isto ocorreu por dificuldades no uso do modelo antigo e/ou, pela diferença de tecnologia empregada, como softwares, hardwares e firmwares mais modernos e eficientes. Esses avanços propiciaram uma aproximação dos tempos dos modelos de mais cortes, diminuindo a diferença entre as tecnologias.

Observando-se os tempos dos TC de 1 corte mais modernos pode-se concluir que as clínicas poderiam agendar exames de 15 em 15 minutos sem risco de formação de filas.

### **6.2.1.2. Aparelhos de 2 cortes**

No primeiro TC de 2 cortes estudado, problemas com o transporte de 2 pacientes enviesaram os valores encontrados. Esse fenômeno não ocorreu no segundo aparelho, o



que representou um efeito claro dos tipos de pacientes atendidos, na primeira unidade, hospitalares e na segunda, ambulatoriais.

Com os valores enviesados pela demora na entrada dos pacientes no primeiro TC, os tempos médios e máximos dos exames neste aparelho ficaram muito longos, mais longos que nos aparelhos de 1 corte. Porém, com a retirada desses vieses, os valores ficaram próximos dos esperados quando comparados aos obtidos pelos TC de um corte.

Podem-se ressaltar os curtos tempos obtidos na etapa de aquisição no primeiro TC de 2 cortes estudado, o que sugere que os protocolos de exames estão bem definidos. Porém, a demora na entrada dos pacientes demonstra haver problemas no transporte dos mesmos, sendo este um ponto a ser tratado para que se possa aumentar a produtividade.

De um modo geral, no segundo TC estudado, os tempos das etapas do processo foram mais curtos que no primeiro TC, exceto o da aquisição propriamente dita que foi 50% maior.

Os resultados das medidas dos tempos nos TC de 2 cortes, nas quais os tempos de aquisição foram menores no primeiro aparelho e os demais tempos menores no segundo, corroboram a tese de que os protocolos do primeiro aparelho estão bem ajustados para uma maior produtividade, e embasam a afirmativa de que o emprego de equipamentos com etapa de aquisição mais rápida não produz, obrigatoriamente, exames mais rápidos. Por outro lado, os tempos mais curtos do segundo aparelho sugerem melhor organização em seu setor, o que pode ser explicado pelo aparelho estar instalado em uma clínica, enquanto o outro estava em um hospital, normalmente um ambiente mais complexo.

O tempo médio total e o tempo máximo dos exames, sugerem a possibilidade de agendamento dos exames de 15 em 15 minutos.

O valor do tempo médio total de todos os TC de 2 cortes foi maior que os valores médios totais dos aparelhos separadamente; isso ocorreu, porque no primeiro aparelho não foram medidos os tempos de entrada do paciente.

### **6.2.1.3. Aparelhos de 4 cortes**

Nesse aparelho foram medidos os tempos dos exames durante seis plantões diferentes, o que permitiu minimizar possíveis vieses inseridos pelos operadores. Esse foi o TC no qual mais exames foram acompanhados.

O TC de 4 cortes estudado estava instalado numa unidade hospitalar e diversos pacientes necessitavam de transporte e alguns exames sofreram atraso em função de

dificuldades deste serviço. Isso normalmente produz um aumento no tempo de chegada do paciente na sala de exames (observar os tempos de chegada dos pacientes do primeiro e terceiro exames de tórax na Tabela 28), mas pode aumentar também o tempo de saída.

Nesse equipamento já se pode observar que a etapa de aquisição passa a pesar pouco no tempo total dos exames. Como dito, o maior tempo de aquisição medido neste TC ocorreu em um exame de crânio no qual o operador esperou desnecessariamente a reconstrução das imagens, alongando muito o tempo desta etapa. Nesse caso, uma mudança no procedimento do operador diminuiria o tempo de exame. O menor tempo total medido foi maior que o tempo mínimo calculado. Essa diferença pode indicar que existe margem para diminuição dos tempos totais. Quanto ao exame mais demorado acompanhado, um exame de crânio e seios da face, é importante ressaltar que o paciente necessitava de transporte e tanto para levá-lo para a sala de exames quanto para retirá-lo desta, o transporte demorou muito, enviesando a medida.

A média calculada dos tempos totais sugere a possibilidade de um agendamento de exames de 15 em 15 minutos, com uma certa margem para problemas e variações.

#### **6.2.1.4. Aparelhos de 16 cortes**

Mesmo com 5 exames (50%) utilizando meio de contraste, os tempos medidos foram curtos. Pode-se observar que pelo procedimento de uma das unidades de preparar o paciente para receber o contraste e de injetar o mesmo durante a etapa “posicionamento do paciente”, os tempos desta ficaram maiores que os normalmente encontrados. Nos exames de crânio com contraste, é possível observar esse mesmo fenômeno ocorrendo durante a etapa “preparação do paciente”, neste caso os pacientes receberam os acessos venosos e o contraste foi injetado numa etapa posterior.

Para os TC de 16 cortes, o tempo total mínimo calculado foi menor que a metade do tempo obtido no exame mais rápido; essa diferença pode representar que existe margem para diminuição nos tempos dos exames. O grande desvio padrão calculado para os tempos totais médios pode ser consequência das diferenças dos procedimentos e dos exames nas três unidades estudadas.

O tempo médio total calculado sugere a possibilidade de agendamento de 10 em 10 minutos.

### **6.2.1.5. Aparelhos de 128 cortes**

Como esperado, os tempos medidos neste aparelho foram mais curtos que nos demais, porém os tempos das outras etapas foram semelhantes aos dos outros equipamentos, o que denota semelhança entre os procedimentos adotados pelas diversas unidades estudadas.

A diferença entre o tempo mínimo total calculado e o tempo total do exame mais rápido acompanhado sugere a possibilidade de alguma diminuição nos tempos, porém, neste equipamento, as diferenças foram menores que nos outros estudados. Isso pode sugerir que a unidade adota um processo mais organizado/padronizado.

A partir do tempo médio total encontrado, pode-se inferir que um agendamento de 10 em 10 minutos não provocaria formação de fila de espera e ainda existiria margem para a ocorrência de problemas.

### **6.2.1.6. Produtividades esperadas**

A produtividade dos equipamentos médicos é importante tanto para os serviços de saúde privados quanto para os públicos, nos quais as listas de espera, no Brasil, podem se estender por meses. Exames mais rápidos podem representar mais exames/tempo, mas a ideia de que dobrar o número de cortes de um TC poderia reduzir para metade do tempo do sistema (uma diminuição linear) não é realista, pois os tempos dos exames não dependem exclusivamente da aquisição de imagens/tempo de reconstrução (ANVISA, 2016, SANTOS *et al.*, 2017, COELLI *et al.*, 2010).

Os resultados das medidas de tempos nos TCs das cinco tecnologias estudadas mostraram que, como esperado, os tempos de aquisição diminuem com o uso de TCs mais modernos, porém, observou-se que os tempos totais médios não acompanharam essa diminuição. Isso produziu valores de produtividades discrepantes, como, por exemplo, apesar do tempo de aquisição dos TC de 1 corte modernos ser, em média, aproximadamente 1 min mais longo que no aparelho de 4 cortes, a produtividade inferida dos TCs de 1 corte modernos (393 exames/mês) foi maior que a do TC de 4 cortes (388 exames/mês). Isso mostra o quanto a etapa “aquisição” pode perder importância se as outras etapas dos exames não forem céleres.

Quanto aos cálculos das produtividades, observa-se que, apesar dos resultados referentes aos aparelhos de 4 e 16 cortes apontarem para valores próximos ao dos modelos modernos de um corte, certamente este é um viés inserido pelos protocolos otimizados

para a produção de mais imagens e não para produtividade nos *multi-slices* e pelos exames de áreas mais longas nos modelos de 16 cortes. Por outro lado, em aparelhos mais lentos é comum os protocolos serem ajustados para aumentar a produtividade. Logo, pode-se esperar que, com protocolos que privilegiem o desempenho, as produtividades dos modelos de mais cortes possam aumentar consideravelmente. TRAVASSOS *et al.* (2015) citam o mesmo problema e enfatizam as altas doses de radiação emitidas por conta do dimensionamento destes protocolos.

Deve-se repetir a ressalva que o método utilizado é uma heurística que, apesar de muito utilizada carrega muitos vieses e, normalmente, não permite uma análise detalhada do processo. Isso fica claro quando se observa que o cálculo da produtividade dos modelos Asteion de 1 corte produziu valores maiores que nos aparelhos de 2 e 4 cortes, o que não é realista.

Porém, os resultados já indicam que, mesmo utilizando-se um TC de 128 cortes, a produtividade não dobraria em relação aos TC de 1 corte modernos. Isso reforça a recomendação da criação de protocolos que permitam a visualização das áreas examinadas sem detalhamento desnecessário. Este caso típico de grandes áreas examinadas com técnicas com cortes muito pequenos que permitem a visualização de estruturas menores que as presentes nestas áreas (JIANG, 2009).

CHWIF e MEDINA (2015) afirmam que métodos heurísticos podem produzir resultados longe dos reais, daí a necessidade do uso de outras ferramentas, como a simulação computacional para estudos como o de produtividade de um dado serviço.

### **6.3. Modelos e simulações dos setores de TC**

Após a caracterização do processo, com a divisão das etapas e, medidas dos tempos de cada uma, se tornou possível a criação de modelos para simulação computacional do funcionamento dos setores de TC.

Foram criados 5 modelos, partindo de um modelo básico até modelos sofisticados, perfazendo um total de 125 combinações diferentes simuladas. Os modelos mais completos chegam a contar com dois TC dos 5 tipos estudados, 8 taxas de chegadas de pacientes diferentes, 3 tipos de pacientes diferentes, 5 áreas examinadas diferentes, 4 vestiários, 2 profissionais com paradas determinísticas para troca de plantão e alimentação e aleatórias diversas, paradas para manutenções preventivas determinísticas e corretivas aleatórias nos TC, controle financeiro (receitas e despesas) inicial, a cada

exame, mensal e total. Mais parâmetros ainda podem ser inseridos, porém deve-se observar se tais parâmetros trariam mais qualidade à simulação que justifique o maior trabalho computacional, haja vista que os modelos mais completos já demoram bastante para “rodar” a simulação.

Como as diferenças dos tempos entre etapas iguais de tipos de exames diferentes não foram significativos, os modelos somente diferem nos tempos da etapa de aquisição entre os tipos de exames e/ou tipo de TC.

Segundo CHWIF e MEDINA (2015), para eliminar-se o efeito transitório gerado pelos números pseudoaleatórios utilizados nas simulações, deve-se utilizar um período de “warm-up” ou “aquecimento” antes da simulação, replicações ou simulações por longos períodos. É comum encontrar na literatura, trabalhos com até 200 replicações.

No modelo inicial desta tese, utilizaram-se 5 replicações e 12 horas de simulação somente, o que pode ser considerado pouco. No segundo modelo foram mantidas as 5 replicações, porém o período de simulação foi aumentado para 1 mês, operando 24 horas/dia, o que já permite uma maior redução dos efeitos citados anteriormente. No terceiro modelo, a opção foi por um longo tempo de simulação, 24 horas diariamente durante 3 anos, sem utilizar replicações, o que, teoricamente, não prejudica os resultados por causa da escolha do longo período de simulação. Nos dois últimos modelos, a opção foi por 10 replicações e um grande período de tempo de simulação, 4 anos.

O indicador Lucro/Tempo de exame foi criado para expressar o máximo de lucro em um período determinado com um tempo médio de exame que não se torne inviável para os pacientes.

### **6.3.1. O Modelo Inicial**

O modelo inicial de um setor de TC foi construído utilizando distribuições normais nos tempos das etapas do processo, sem definição de paradas programadas, considerando chegadas constantes e pacientes agendados sem uso de contraste.

Observou-se que ocorreu formação de fila, pois os tempos totais no sistema em todos os tipos de exames foram bem maiores que os em operação, o que mostra que os pacientes ficaram esperando atendimento.

Os resultados sugeriram que mudanças nos processos poderiam produzir ganhos de produtividade. Assim, nas simulações subsequentes novos modelos e cenários foram criados para testar e comprovar essa hipótese.

### **6.3.2. Estudo do efeito de alterações estruturais no tempo de atendimento dos pacientes**

Com a adição de novos parâmetros, esta etapa do estudo simulou e comparou oito cenários para verificar quais configurações poderiam reduzir o tempo médio no sistema de pacientes em serviço de TC hospitalar. Foram simuladas 24 combinações com os oito cenários e os três tipos de TCs escolhidos. O foco foi especificamente na diminuição dos tempos de exame e na produtividade de cada tipo de equipamento, sem estudar os custos dos cenários.

A adição dos itens propostos nesse modelo se mostrou eficiente na diminuição dos tempos dos pacientes no sistema. Os setores com TCs menos velozes se mostraram mais sensíveis às modificações propostas. Observa-se que adicionar um segundo vestiário e introduzir o agendamento noturno para um setor com um TC de 1 corte permitiria que o tempo médio no sistema fosse menor do que o de um setor padrão com um TC de 4 cortes. Adicionando-se ainda um profissional de enfermagem, os tempos totais dos exames nesse setor seriam somente um pouco maiores que com um TC de 128 cortes em um setor padrão. Esse resultado deve ser considerado, pois o investimento para obter-se a mesma produtividade com a substituição de um TC de 1 corte por outro TC de 128 cortes pode ultrapassar R\$ 1.000.000,00. Outro resultado a ser considerado é que um setor com TC de 4 cortes com todas as alterações propostas teria um tempo de atendimento ao paciente menor que um setor com um TC de 128 cortes padrão.

Os resultados mostraram que alterar a estratégia de agendamento dos pacientes pode reduzir os tempos de espera dos pacientes e aumentar a produtividade. O agendamento noturno é uma opção especialmente interessante considerando-se que não são necessários novos recursos (o operador e o equipamento já estão disponíveis).

Os resultados chamaram a atenção para a importância do estudo dos processos a fim de otimizá-los. A construção de um segundo vestiário e/ou a contratação de um profissional de enfermagem poderia reduzir ainda mais o tempo de atendimento ao paciente, mas, nesse caso, os custos incorridos teriam que ser levados em conta na análise de viabilidade e efetividade. Esse resultado se assemelha aos obtidos por SANTOS *et al.* (2012), COELLI *et al.* (2007) e FERREIRA *et al.* (2008).

Essa etapa do estudo indicou que a duração do exame de TC diminui, mas não proporcionalmente usando modelos com “mais cortes”. Por exemplo, trocar um TC de 1

corte por um modelo de 128 cortes implicaria em uma diminuição de 45% no tempo do sistema.

Os resultados obtidos nessa fase apontaram a necessidade de se considerar os custos da implementação de cada modelo/cenário proposto. Assim, novos modelos foram criados considerando as despesas e receitas em geral.

### **6.3.3. Estudo da rentabilidade de um setor de TC incipiente**

O objetivo desta etapa do estudo foi simular e comparar cenários para determinar em quanto tempo um novo setor de TC se tornaria lucrativo e que lucro seria obtido após 3 anos usando os cinco tipos de TCs estudados.

Foram simulados 4 cenários, com duas taxas de chegadas de pacientes crescentes ao longo dos 3 anos simulados e com e sem obras para a instalação do setor. Estes cenários foram simulados com equipamentos novos e usados das cinco tecnologias de TC estudadas. No total foram simuladas 36 combinações diferentes.

Somente os cenários 2 e 4 foram simulados para o TC de 128 cortes, visto que a pequena demanda dos cenários 1 e 3 não justificaria o valor do investimento em um equipamento deste tipo.

Em nenhuma das simulações nos cenários 1 e 3 (menor demanda de exames) obteve-se o retorno do investimento dentro dos 36 meses, enquanto que nos cenários 2 e 4, excetuando-se os TC de 128 cortes novos, todas as outras opções obtiveram retorno do investimento nos 36 meses simulados. Considerando-se somente os TCs novos, a única tecnologia que permitiria retorno do investimento antes de 24 meses seria a de TCs de 1 corte, ainda assim se não fossem necessárias obras físicas (cenário 2).

Embora os resultados obtidos nas seções 5.3.4 e 5.3.5 sugiram que setores de TC podem ser muito lucrativos, os resultados da seção 5.3.3 indicam a necessidade de uma análise realista do número esperado de exames antes da aquisição do equipamento de TC. Esses resultados mostraram que a especificação e aquisição de TCs sofisticados e caros para unidades com pequena demanda por exames pode representar a inviabilização financeira de tais unidades.

Uma especificação cuidadosa das características do equipamento para aquisição é importante para os serviços de saúde privados e públicos. Falhas na especificação podem dimensionar inadequadamente os equipamentos, não cumprindo com as expectativas de produção ou gerando gastos excessivos e ociosidade, respectivamente. Deve-se ressaltar

que no setor público brasileiro, as listas de espera podem se estender por meses (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Como mencionado, apesar de sua menor velocidade, TCs de 1 ou 2 cortes ainda permitem a execução da maioria dos exames (exceto exames cardíacos que exigem TCs de 64 cortes ou mais e, angiográficos de grandes vasos que somente são gerados com qualidade em equipamentos de 16 cortes ou mais) (SEERAM, 2015). Portanto, a escolha de equipamentos mais simples e/ou usados pode adequar-se às necessidades de unidades de saúde, especialmente para aquelas com um pequeno número de exames simples. Nesse caso, a opção por modelos mais simples e mais baratos poderia facilitar o acesso à tecnologia, diminuindo filas de espera sem aumento de investimento (SANTOS *et al.*, 2018, SANTOS *et al.*, 2017, OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Embora exames mais rápidos possam representar mais exames/tempo, os custos podem se tornar proibitivos e os ganhos de produtividade desnecessários (NISKA, 2010). Assim, a escolha de aparelhos mais sofisticados deve ser embasada por uma grande demanda por exames realisticamente determinada e/ou pela necessidade de executar exames não possíveis em modelos mais simples, também determinada por um estudo criterioso.

Do ponto de vista mercadológico, os fabricantes de TC introduzem cada vez mais novos modelos e tentam convencer os compradores de sua necessidade. Porém, os custos de aquisição e manutenção tendem a ser maiores nesses novos modelos, assim, a especificação correta dos equipamentos se torna ainda mais importante para evitar os efeitos da propaganda de marketing.

Essa etapa do estudo adicionou custos ao modelo do setor de TC e se preocupou somente em estudar a rentabilidade deste setor durante a sua instalação e consolidação, não atentando para os tempos dos exames, ou diferenciando as receitas e despesas em função do tipo de exame executado. Para suprir essas necessidades, novos modelos foram desenvolvidos com a inserção de novos parâmetros.

#### **6.3.4. Simulação de um setor de TC hospitalar com grande demanda por exames usando TC(s) de 4 cortes**

Após a criação dos 3 modelos anteriores, se fez necessário o desenvolvimento de modelos mais sofisticados que permitissem o estudo dos setores de TC por diferentes



pontos de vista, lucratividade, conforto do paciente e utilização dos recursos, por exemplo. Nesses modelos, foram adicionados novos parâmetros tornando-os mais realistas. Os aspectos financeiros passaram a ser diferenciados em função do tipo de exame executado e não mais utilizando-se valores médios únicos para despesas e receitas. Foram adicionadas paradas para os TC, tanto programadas, para manutenção preventiva, quanto não programadas para atendimentos corretivos. Passou-se a considerar que um paciente não esperaria mais que 60 minutos para fazer o exame e simplesmente desistiria de fazê-lo e iria embora. O tempo de desistência foi arbitrado. O número de pacientes desistentes passou a ser contado. A possibilidade do uso de 2 TCs também foi simulada. Foi criado o indicador com o objetivo encontrar a melhor relação entre lucratividade e conforto do paciente. Teoricamente, quanto maior o valor, melhor.

Foram simulados setores com TCs de 4 cortes, com tempos diferenciados para cada tipo de exame. O objetivo deste modelo foi conhecer o comportamento dos TCs de 4 cortes com as 8 taxas de chegadas de pacientes estudadas nos 6 cenários propostos. Com as combinações propostas, foram produzidas 35 simulações diferentes ao todo.

Mesmo a menor taxa de chegada de pacientes simulada neste item permitiu uma produção mensal maior que a média da maior taxa simulada na seção 5.3.3, daí essa etapa se referir a unidades com grandes demandas. Assim, espera-se que todos os modelos indiquem o retorno do investimento no período simulado. No limite superior, a taxa 8 representou uma situação de uso extremo.

No cenário1, o padrão, com 1 vestiário, 1 TC e somente o operador de TC como recurso, observou-se que apesar do crescimento do número de pacientes atendidos esperado pela troca da taxa de chegadas 5 pela 6, o aumento da média mensal sugeriu um aumento diário efetivo muito menor, efeito da grande quantidade de pacientes desistentes. Apesar do indicador Lucro/tempo de exame ter indicado a taxa 4 como a ideal, para esse cenário, a taxa 3 pareceu ser a máxima. Nessa taxa, os tempos médios dos exames não cresceram tanto, denotando que os pacientes não ficaram muito tempo esperando, as perdas de pacientes foram pequenas, a taxa de ocupação do operador não foi muito grande e, ainda assim, o retorno do investimento inicial ocorreu num curto período de tempo.

O cenário 2 adicionou 1 vestiário ao cenário padrão. Com essa alteração, o tempo dos exames diminuíram consideravelmente e a perda de pacientes também. Pode-se observar neste cenário o mesmo fenômeno do menor crescimento do número de pacientes atendidos ao trocar-se a taxa de chegadas 5 pela 6 que ocorreu com o cenário padrão, porém com menor intensidade. Apesar do pequeno aumento do investimento inicial, em

todas as taxas simuladas, o lucro foi maior que o do cenário padrão. A utilização do operador foi sempre um pouco maior que no cenário padrão. O indicador Lucro/Tempo de exame apontou para a taxa 4 como a demanda máxima ideal para o cenário, podendo até ser um pouco maior, apesar de nesse caso os tempos de exame começarem a aumentar rapidamente. Os resultados para a taxa 4 nesse cenário foram semelhantes aos obtidos na taxa 3 no cenário padrão, porém, como esperado, o índice de utilização do operador aumentou bastante, o que é bom, pois representou menor ociosidade de um recurso. Apesar do maior investimento inicial, esse cenário representou um grande acréscimo nos lucros, principalmente da taxa de chegadas 4 em diante.

No cenário 3, com a adição de um profissional de enfermagem ao cenário padrão, os resultados foram inferiores aos obtidos com adição de um vestiário no cenário 2, porém representaram uma melhora sobre o primeiro cenário. Pode-se observar neste cenário o mesmo fenômeno do menor crescimento do número de pacientes atendidos ao trocar-se a taxa de chegadas 5 pela 6 que ocorreu com o cenário padrão, com a mesma intensidade. O indicador Lucro/Tempo de exame indica a taxa 4 como a demanda máxima ideal para o cenário. Com essa taxa, os tempos de exames foram ligeiramente mais longos que os obtidos com a taxa 3 no primeiro cenário. Devido ao aumento do custo mensal fixo, somente a partir da taxa 5 houve aumento do lucro em 4 anos em relação ao cenário padrão. Nesse cenário a divisão das tarefas entre o operador e a enfermagem diminuiu bastante a ocupação do operador.

No cenário 4 foram adicionados um vestiário e um profissional de enfermagem ao cenário padrão. Para esse cenário foram simuladas as oito taxas de chegadas de pacientes propostas. O resultado das perdas de pacientes na taxa 5 pareceu ser um outlier, ou valor anormal, produzido na simulação pela natureza aleatória das variáveis. Observou-se pouca perda de exames nas cinco primeiras taxas simuladas. Todos os resultados deste cenário com a taxa de chegadas 8 foram melhores que no cenário padrão com a taxa 6 e no segundo cenário com a taxa 7. O retorno do investimento a partir da taxa 5 foi obtido já no primeiro mês. O indicador Lucro/Tempo de exame indicou a taxa 5 como sendo a demanda máxima ideal para o cenário.

Em relação ao cenário 1, a partir da taxa 5 houve aumento do lucro em 4 anos, mesmo com o aumento do investimento inicial e do custo mensal fixo. Nesse cenário a divisão das tarefas entre o operador e a enfermagem diminuiu a ocupação do operador.

Entre os cenários com 1 TC, sem dúvida para grandes demandas de exames, da taxa 5 em diante, o cenário 4 foi o mais indicado, porém até a taxa 4, o cenário 2 foi o ideal.

O cenário 5 adicionou um TC e três vestiários ao cenário padrão. Foram simuladas as taxas de chegadas de pacientes de 4 a 7. Nesse cenário, a ocupação do operador sempre foi alta, desde a taxa 4, o que parece óbvio, pois este era responsável por operar sozinho os dois TCs e ainda atender os pacientes. Com a taxa 7 esse índice cresceu de maneira que pode ser inexecutável. Os tempos de exames foram muito longos com as taxas 6 e 7. Nesse cenário, os tempos de exames com a taxa 5 se assemelharam aos obtidos com a taxa 4 no cenário padrão. O indicador Lucro/Tempo de exame indicou a taxa 4 como sendo a demanda máxima ideal para o cenário. Mesmo com grande investimento inicial, desde a taxa 4, o retorno desse investimento ocorreu em pouco tempo, porém em um tempo maior que no cenário padrão, porém, todas as taxas simuladas propiciaram aumento do lucro em 4 anos em relação ao cenário padrão.

No sexto cenário foram adicionados 1 TC, 3 vestiários e um profissional de enfermagem ao cenário padrão. Foram simuladas as taxas de chegadas 4, 5, 6, 7 e 8. Mesmo com o maior investimento todas as taxas simuladas, a partir da taxa 5, propiciaram aumento do lucro em 4 anos em relação a todos os outros cenários simulados, exceto em relação ao cenário 5, no qual ocorreu a partir da taxa 6. Esses resultados demonstram o quanto pode ser rentável um serviço de TC, quando o volume de exames é adequado. Pode-se observar que neste cenário, mesmo com a maior taxa de chegada de pacientes, o percentual de perdas de pacientes foi pequeno. Observou-se que o cenário simulado permitiu que a taxa 8 fosse alcançada e muitos pacientes fossem examinados diariamente. Até taxa 7 os tempos médios ponderados se mantiveram curtos, crescendo na taxa 8. Neste cenário, o retorno do investimento ocorreu em pouco tempo. O indicador Lucro/Tempo de exame, o tempo de exame e o percentual de perda de pacientes indicaram a taxa 6 como a demanda ideal para esse cenário.

### **6.3.5. Síntese**

De um modo geral, o último cenário se mostrou o mais indicado para grandes demandas, a partir da taxa de chegadas 5. Para taxas menores, o cenário 2 foi o mais indicado. O cenário 4 proporcionou um lucro um pouco menor, mas permitiu aumentos de demanda sem prejuízo aos tempos de exames; esse cenário também permitiu uma diminuição dos tempos de atendimento em geral.

Os resultados obtidos com o indicador Lucro/tempo de exame, para esse modelo, se mostraram condizentes com os resultados das análises em geral.

### **6.3.6. Simulação de um setor de TC hospitalar com grande demanda por exames usando TC das cinco tecnologias estudadas**

O último modelo criado se assemelhou ao anterior. Esse modelo teve o objetivo de comparar os desempenhos dos TC das cinco tecnologias estudadas utilizando taxas de chegadas iguais. Para a criação deste último modelo, foram utilizados os tempos médios ajustados de todas as aquisições para cada um dos cinco tipos de TC estudados. As diferenças dos tipos de exames deixaram de ser consideradas. Foram criados seis cenários e simulados para os cinco tipos de TC estudados com três taxas de exames pré-determinadas, perfazendo um total de 29 combinações.

No cenário 1, o padrão, com 1 vestiário, 1 TC, somente o operador de TC como recurso e com a taxa de chegadas 1, não foi possível simular o uso de TC de 1 corte devido aos longos tempos obtidos. Como esperado, quanto mais rápido o aparelho, menos pacientes foram perdidos por desistência. As perdas de pacientes permaneceram grandes e os tempos de exame longos até os TC de 2 cortes, o que fez que esse tipo de TC produzisse o menor lucro em 4 anos. Por outro lado, o menor custo inicial e uma menor taxa de perda de pacientes, fizeram com que os TC de 4 cortes fossem os mais rentáveis no período. A taxa de ocupação do operador foi grande nos TC de 2 cortes, porém diminuiu nos mais velozes. O retorno dos investimentos é obtido rapidamente, primeiro nos TC de 2 cortes e, por último, nos de 128 cortes, efeito dos investimentos iniciais. O indicador lucro/tempo de exame indicou os TC de 128 cortes como o modelo mais indicado para esse cenário.

No segundo cenário, com a adição de mais um vestiário, foi possível a simulação utilizando TC de 1 corte, que diminuiu as perdas de pacientes. Nesse cenário, todos os tipos de TC simulados obtiveram tempos totais de exames médios bem menores que no cenário 1 e mesmo os TC de 1 corte produziram tempos de exames menores que os de 2 cortes no primeiro cenário. Destaca-se a grande diminuição da perda de pacientes em todos os TC em relação ao cenário 1. Apesar do maior investimento inicial, todos os TC estudados obtiveram aumento do lucro após os 4 anos de simulação em relação ao cenário padrão. O setor com um TC de 4 cortes gerou o maior lucro no período simulado, neste

cenário. Isso ocorreu devido ao menor investimento inicial combinado a uma pequena quantidade de pacientes perdidos. O retorno do investimento ocorreu em prazos curtos para todos os TC estudados, mais rapidamente nos de 1 corte e menos nos de 128 cortes, consequência dos valores dos investimentos iniciais. O indicador lucro/tempo de exame indicou o TC de 128 cortes como o modelo mais indicado para este cenário.

O terceiro cenário simulado adicionou um profissional de enfermagem ao cenário padrão. Esse cenário permitiu uma boa diminuição dos pacientes desistentes, mas não tanto quanto o cenário 2. Porém, este cenário também permitiu a simulação com os TC de 1 corte. Os tempos médios dos TC de 1 e 2 cortes foram muito longos, desaconselhando o uso de tais tipos de TC nas condições simuladas nesse cenário. Os percentuais de perdas de pacientes neste cenário sugeriram que somente modelos a partir dos TC de 4 cortes eram adequados. O alto percentual de pacientes perdidos caiu dos TC de 1 corte até os de 4 cortes, tendendo então para a estabilidade. Neste cenário, todos os tipos de TC simulados obtiveram tempos totais de exames médios menores que no cenário 1, porém maiores que no cenário 2. Mesmo com um investimento inicial menor, o lucro após 4 anos dos TC de 1 corte foi o menor entre os TCs estudados, enquanto o maior lucro foi obtido pelos TC de 4 cortes. Mesmo com o maior investimento nos equipamentos de 128 cortes, o indicador Lucro/Tempo mostrou que esse era o tipo de TC mais indicado neste cenário. A ocupação da enfermagem apresentou uma leve tendência de aumento entre os TC mais simples para os mais sofisticados.

O quarto cenário adicionou ao cenário padrão um vestiário e um profissional de enfermagem. Essas alterações permitiram simular um cenário com uma taxa de chegada de pacientes maior que a dos três primeiros cenários. Mesmo com o aumento do número de pacientes atendidos, o percentual de pacientes perdidos nos TC de 1 corte permaneceu semelhante ao valor obtido no cenário 3. Neste cenário, excetuando-se os TC de 1 corte que foi ainda mais demorado, todos os tipos de TC simulados obtiveram tempos totais de exames médios semelhantes aos obtidos no cenário 2 e menores que no cenário 3, apesar do grande aumento do número de pacientes recebidos. O lucro com os TC de 1 corte foi novamente o menor após 4 anos, mesmo tendo um investimento inicial menor e tendo o retorno desse em pouco tempo. Já o maior lucro foi obtido pelos TCs de 4 cortes. Enquanto a ocupação do profissional de enfermagem aumentou ligeiramente, a do operador decaiu nos aparelhos mais velozes. O indicador Lucro/Tempo indicou que esse era o tipo de TC mais indicado para o cenário simulado. Entretanto, considerando-se o

número de pacientes perdidos, o tempo de exame médio e o lucro após 4 anos, os TC de 4 cortes foram os mais indicados.

No quinto cenário foram adicionados ao cenário padrão, um TC e três vestiários. Essas alterações permitiram praticamente acabar com as perdas de pacientes. Assim, a média de exames mensais foi igual para todos os TC. Comparando-se este cenário com o cenário 2 (com 2 vestiários e 1 TC), não houve ganhos nos tempos, apesar do maior investimento, porém pode-se inferir que o ganho foi na estabilidade do setor, pois o mesmo não pararia de receber pacientes mesmo quando algum TC ficasse indisponível. Se comparados setores com TC de 1 corte, a opção pelo cenário 5 se tornou interessante por produzir um maior lucro no período simulado, mesmo com o maior investimento inicial. Ainda em comparação com o cenário 2, o tempo médio dos exames foi maior com os TC de 1 corte no cenário atual, menor com os de 2 cortes e semelhantes para os demais TC. Nesse cenário, como não houve perdas de pacientes/exames, o menor investimento na aquisição dos TC de 1 corte produziu o maior lucro após os 4 anos, enquanto o menor lucro foi obtido com os TC de 128 cortes, como esperado. A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes. Novamente, o indicador Lucro/Tempo de exame indicou que os TC de 128 cortes eram os mais indicados para o cenário, porém, considerando-se os tempos de exame e o lucro obtido, os TC de 4 cortes foram considerados mais adequados.

No sexto e último cenário deste modelo, foi adicionado um profissional de enfermagem ao cenário cinco. Com essa configuração, foi possível simular o modelo com uma taxa de chegada de pacientes ainda maior que a do cenário 4. O percentual de pacientes perdidos nos TC de 1 corte foi bem maior que nos demais TC, assim como o tempo de exame. Nas simulações com os TC de 128 cortes a perda de pacientes foi muito pequena, podendo ser desprezada, visto o número total de pacientes atendidos e o tempo da simulação. Os tempos nos TC de 1 corte foram muito longos, principalmente para os pacientes agendados. Os resultados da simulação sugeriram que, para esse cenário, os TC de 1 corte eram desaconselháveis. Porém, a partir dos TC de 2 cortes, os tempos se tornaram mais aceitáveis. Os TC de 1 corte obtiveram o menor lucro após 4 anos, mesmo com o menor investimento inicial. O maior lucro foi obtido pelos aparelhos de 2 cortes. Nesse cenário, o investimento inicial, mesmo para os TC de 128 cortes, foi amortizado muito rapidamente. A ocupação do operador decaiu nos aparelhos mais velozes, diminuindo de um valor muito alto, talvez inexequível, nos equipamentos de 1 corte para menos da metade nos de 128 cortes. A ocupação da enfermagem apresentou uma leve tendência de aumento entre os TC mais simples e os mais sofisticados. O indicador

Lucro/Tempo sugeriu que os TC de 128 cortes eram os mais indicados para esse cenário. Porém, se comparados os tempos dos exames, o lucro no período e número de pacientes perdidos, mais uma vez os TC de 4 cortes se mostraram competitivos.

### **6.3.7. Síntese**

De um modo geral, o último cenário se mostrou o mais indicado para demandas muito grandes, pois os tempos de exame se mantiveram dentro de limites razoáveis, assim como a perda de pacientes. O primeiro cenário não permite o uso de TC de 1 corte com a demanda simulada. O segundo cenário é o mais indicado para demandas menores. O cenário 4 permite uma demanda maior, intermediária entre a simulada nos cenários 1, 2, 3 e 5, porém menor que a simulada no cenário 6.

Os resultados obtidos com o indicador Lucro/tempo de exame, para esse modelo se mostraram viciados, sempre apontando para a escolha do TC mais veloz. Isso ocorreu pelo fato dos lucros após os 4 anos terem sido parecidos nos diversos TC e os tempos de exames diminuírem nos TC de mais cortes, logo, o numerador permanece com valores próximos enquanto o denominador diminui. O uso desse indicador só é possível, neste modelo, se períodos menores forem simulados, aumentando a importância do investimento inicial no lucro final. Desta maneira, nos TC mais baratos os lucros seriam maiores que nos mais caros. Com longos tempos de simulação, a diferença dos custos de implantação se diluem, perdendo importância. As menores perdas de pacientes nos TC mais velozes também beneficiam estes modelos.

Muitos outros cenários podem ser propostos como, por exemplo, setores com TC de tipos diferentes com distribuição dos exames em função das características do TC. Por exemplo, um setor com um TC de 1 corte e ou outro de 128 cortes, onde os exames mais simples e sem contraste são feitos no TC de 1 cortes e os contrastados ou mais complexos são executados no TC de 128 cortes. Em caso de parada do TC de 1 corte, todos os exames seriam feitos no TC de 128 cortes. Na condição inversa, os exames mais sofisticados que somente são feitos nos TC de 128 cortes seriam perdidos, enquanto os mais simples seriam feitos no TC de 1 corte, até a restituição da normalidade. Poder-se-iam também criar cenários com 2 operadores de TC nos modelos com 2 TC, entre outras opções possíveis.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A importância dos TC para o diagnóstico médico atualmente é muito grande. O conhecimento do processo de execução dos exames de TC permite que este possa ser melhor utilizado, aumentando o número de atendimentos.

A pesquisa sobre a oferta de TC no mercado mundial mostrou que poucos são os modelos mais simples mantidos à venda mesmo em mercados mais carentes. Isso afeta tanto regiões pobres do planeta, quanto as regiões mais pobres e remotas do Brasil. Grupos não governamentais de países desenvolvidos e, principalmente, a Organização Mundial da Saúde (OMS) têm se esforçado em aumentar o acesso de países menos desenvolvidos às tecnologias médicas (WHO, 2013), haja vista que muitas populações sofrem pela falta de equipamentos médicos (BALARAJAN, 2011; SHANNOUN, 2009), e quando os possuem, sofrem com a falta de mão de obra qualificada (GUERMAZI, 2012), dependendo, de suporte técnico de escritórios distantes (KACHIENG'A, 2002; MARANGA, 2012; FMOH, 2011). Assim, a inserção de tecnologias mais modernas e onerosas não vem contribuindo para o barateamento dos equipamentos mais simples, e sim para a retirada desses do mercado, embora ainda haja carência destes equipamentos, mesmo com tecnologias mais antigas. A criação de modelos de TC com capacidade de atualização progressiva (*upgradables*), proposta neste trabalho, é uma medida capaz de aumentar a oferta de aparelhos mais baratos.

Com relação à pesquisa sobre os parâmetros importantes na especificação dos TC, pode-se concluir que para os entrevistados no Brasil o mais importante são os custos envolvidos e que a substituição de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos, leva, principalmente, ao aumento de velocidade nos exames. Para os entrevistados nos países estrangeiros, o mais importante na especificação é a qualidade de imagem e a dose de radiação emitida, enquanto o aumento do número de cortes permite uma melhora na qualidade do diagnóstico. Conclui-se, então, existir uma diferença dos enfoques, no Brasil, mais foco no lucro e nos países estrangeiros, na segurança do paciente.

Sobre o estudo dos tempos das etapas dos exames de TC e a produtividade dos setores estudados, pode-se concluir que conhecer a real capacidade de execução de exames de cada tipo de TC é um importante dado a ser utilizado na aquisição do melhor aparelho para a realidade em que será empregado. Conhecer os tempos dos exames e de cada etapa permite que uma política realista de agendamento dos exames possa ser



implantada, evitando ociosidade ou formação de filas. Observando os tempos das etapas dos exames, concluiu-se que os tempos das etapas de entrada e saída, preparação e posicionamento do paciente são mais importantes na formação do tempo total de exame que o tempo da aquisição que é dependente, entre outras variáveis, do tipo do TC. Assim, medidas administrativas-organizacionais podem produzir alterações no tempo total de cada exame e conseqüentemente na produtividade do setor. Em relação às produtividades, a demonstração que as diferenças das obtidas com aparelhos de “mais cortes” em relação ao mais simples, não é tão grande quanto suposto e preconizada pelo mercado deve ser ressaltada. Os resultados mostraram a importância do aprimoramento dos processos independentemente do tipo de equipamento.

Os modelos simulados mostraram que alterações nas estruturas atuais dos setores de tomografia computadorizada e/ou na política de agendamento podem modificar a produtividade destes setores e/ou melhorar o atendimento aos pacientes com a diminuição dos tempos de espera, por exemplo. As simulações permitiram inferir sobre qual o tipo de TC mais adequado para os cenários estudados, representando uma ferramenta de apoio à decisão na especificação do equipamento indicado para a realidade de cada unidade de saúde.

O estudo da lucratividade dos setores de TC utilizando simulação computacional mostrou o quanto um setor de TC pode dar prejuízo ou, por outro lado, grandes lucros.

A simulação mostrou a capacidade de se estudar mudanças nos processos sem a necessidade de implantação física destes.

Pode-se concluir que os resultados deste trabalho indicaram a importância do estudo dos processos de obtenção dos exames de TC para que os gestores tenham condições de especificar corretamente o aparelho que melhor se adequa à necessidade.

Até onde foi possível detectar não existem trabalhos com escopo similar, sendo os poucos trabalhos da área restritos a departamentos ou setores específicos. O presente trabalho, assim, possui grande relevância e originalidade por disponibilizar simulações de cenários de setores de tomografia computadorizada, dados de tempos de aquisição, de exame e de produtividade raramente divulgados e, até agora, pouco disponíveis de uma forma geral. Também a caracterização da oferta de tomógrafos computadorizados no mercado mundial representa um trabalho inédito e de grande relevância para os gestores de saúde.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLERT, F.C., BORBA, G.S., MOURA, L.C.S., SILVA, D.D., SILVA, D.O.. Gestão de Serviços na Área da Saúde: a Simulação Computacional no auxílio à tomada de decisão. 2009. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, Bahia, Brasil.
- ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. <http://tinyurl.com/jjkazto>. Acessado em 4 de Maio de 2016.
- AZADIVAR, F. A tutorial on simulation optimization. Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, p.184-204, 1992.
- BAHADORI, M., TEYMOURZADEH, E., HOSSEINI, S. H., & RAVANGARD, R. (2017). Optimizing the Performance of Magnetic Resonance Imaging Department Using Queuing Theory and Simulation. *Shiraz E-Medical Journal*, 18(1).
- BALARAJAN, Y., SELVARAJ, S., SUBRAMANIAN, S. V. (2011). "Health care and equity in India." *The Lancet*, 377.9764: 505-515.
- BANKS, J.. Panel session: The future of simulation. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, p.1453-1460, 2001.
- BERDAHL, C. T., VERMEULEN, M. J., LARSON, D. B., SCHULL, M. J. (2013). Emergency department computed tomography utilization in the United States and Canada. *Annals of emergency medicine*, 62(5), 486-494.
- BOLAND, G.W.L.; HOUGHTON, M.P.; MARCHIONE, D.G.; MCCORMICK, W. *Maximizing Outpatient CT Productivity: The use of multiple technologists to increase patient throughput and CT capacity*. Journal of American College of Radiology. 2008; 5: 119-125. EUA.
- CARDOSO, L.E.Z., & JUNIOR, C.F.J. (2016). Simulação Computacional: Análise Comparativa dos Softwares Arena® e Promodel®. *Tekhne e Logos*, 7(1), 14-30.
- CHWIF, L.; MEDINA, A.C.. (2015) *Modelagem e simulação de eventos discretos, teoria e aplicações*. Quarta edição. São Paulo. Elsevier Brasil.
- CIERNIAK, R.. *X-ray computed tomography in biomedical engineering*. Springer Science & Business Media, 2011.
- COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., PEREIRA, W.C.A., e ALMEIDA, R.M.V.R. (2004). Simulação computacional de estratégias de manutenção de equipamentos de

- mamografia. *In Anais do III Congresso Latino Americano de Engenharia Biomédica* (pp. 397-400).
- COELLI, F.C., FERREIRA, R.B., ALMEIDA, R.M.V.R., PEREIRA, W.C.A. (2007). Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow. *Computer methods and programs in biomedicine*, 87(3), 201-207.
- COELLI, F.C. (2008). *Simulação Computacional por Eventos Discretos na Otimização do Fluxo de Pacientes e na Caracterização de Custos em Clínicas de Mamografia* (Tese de doutorado em Engenharia Biomédica. Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro).
- COELLI, F.C., ALMEIDA, R.M.V.R., PEREIRA, W.C.A. (2010). A cost simulation for mammography examinations taking into account equipment failures and resource utilization characteristics. *Journal of evaluation in clinical practice*, 16(6), 1198-1202.
- CONSELHO REGIONAL DE MEDICINA DE MINAS GERAIS. “Debate: o reajuste da Tabela SUS aplicável aos hospitais filantrópicos” <http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cssf/audiencias-publicas/audiencia-publica-2015/audiencia-31-03-tarde/apresentacao-2>. Acessado em 04 de Janeiro de 2019.
- DUARTE, A.F.; SOLER, R.C.; ZAVAREZZI, F. (2005). Nasal endoscopy associated with paranasal sinus computerized tomography scan in the diagnosis of chronic nasal obstruction. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 71(3), 361-363.
- FERREIRA, R.B.; COELLI, F.C.; PEREIRA, W.C.A.; ALMEIDA, R.M.V.R.. Análise de Desempenho do Fluxo de Atendimento Hospitalar com Auxílio da Simulação Computacional. In: III Congresso Latino Americano de Engenharia Biomédica, 2004, João Pessoa. v. 5. p. 389-392.
- FERREIRA, R.B., COELLI, F.C., ALMEIDA, R.M.V.R, PEREIRA, W.C.A. (2008) “Optimizing patient flow in a large hospital surgical centre”, In: *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, v. 14, p.1031-1037.
- FISHMAN, G.S., 2001, Discrete event simulation: modeling, programming and analysis. Londres, Springer-Verlag. (ISBN 0-387-95160-1).
- GEER MOUNTAIN SOFTWARE. <http://www.geerms.com>. Acessado em 07 de setembro de 2017.

## GENERAL ELECTRIC HEALTHCARE.

[http://www3.gehealthcare.com/en/global\\_gateway](http://www3.gehealthcare.com/en/global_gateway). Acessado em 14 de Março de 2016.

GINDE, A.A., FOIANINI, A., RENNER, D.M., VALLEY, M., CAMARGO, C.A. (2008). Availability and quality of computed tomography and magnetic resonance imaging equipment in US emergency departments. *Academic emergency medicine*, 15(8), 780-783.

GUERMAZI, A., VANEL, D., RAJHI, H., MNIF, N., ROEMER, F.W. (2012). The international skeletal society outreach programme in Tunisia 2011. *Skeletal radiology*, 1-3.

HARREL, C.R., et al. Simulação: otimizando os sistemas. São Paulo. Instituto IMAM, 2002.

HEALTH TECHNOLOGY MANAGEMENT POLICY (MEDICAL DEVICES) – Republic of Sudan – Federal Ministry of Health. 2011. [http://www.fmoh.gov.sd/Health-policy/SudanHTA&MPolicy\\_final.pdf](http://www.fmoh.gov.sd/Health-policy/SudanHTA&MPolicy_final.pdf). Acessado em 14 de agosto de 2016.

HITACHI MEDICAL SYSTEMS. <http://www.hitachimedical.com>. Acessado em 17 de março de 2016.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2009. Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária-2009. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

JHAVERI, K. S., SAINI, S., LEVINE, L.A., PIAZZO, D.J., DONCASTER, R.J., HALPERN, E.F., JORDAN, P.F. & THRALL, J. H. (2001). Effect of multislice CT technology on scanner productivity. *American Journal of Roentgenology*, 177(4), 769-772.

JIANG, H. 2009. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE.

JUCHEM, B.C., DALL'AGNOL, C.M., MAGALHÃES, A.M.M.D. (2004). Contraste iodado em tomografia computadorizada: prevenção de reações adversas. *Revista brasileira de enfermagem*. Brasília. Vol. 57, n. 1 (jan./fev. 2004), p. 57-61.

- KACHIENG'A M.O., 2002. *Technology management in the public health sector: Professional view from equipment maintenance experts*. East Africa Medical Journal. 2002;81(6).
- KOVALCHUK, S.V., FUNKNER, A.A., METSKER, O.G., & YAKOVLEV, A.N., 2018. *Simulation of patient flow in multiple healthcare units using process and data mining techniques for model identification*. Journal of biomedical informatics 82, 128-142.
- KROFT, L.J., ROELOFS, J.J., GELEIJNS, J., 2010. *Scan time and patient dose for thoracic imaging in neonates and small children using axial volumetric 320-detector row CT compared to helical 64-, 32-, and 16- detector row CT acquisitions*. *Pediatr Radiol* 40 (3): 294-300.
- LEITE, M.A., VILA, V.S.C.. Dificuldades vivenciadas pela equipe multiprofissional na unidade de terapia intensiva. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, v. 13, n. 2, p. 145-150, 2005.
- LIN, Q., LIU, L., WANG, D., & LI, Y. (2015, December). Process optimization for operating room base on pro-model. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2015 IEEE International Conference on (pp. 1332-1336). IEEE.
- MEDMODEL “Better Decisions – Faster”  
<https://www.promodel.com/products/MedModel>.
- MARANGA S., KIHU J. e MUTIA D.. Maintenance management of medical equipment in hospitals, *Industrial Engineering Letters*. 2012;2(3): 9-19.
- MENEZES, M. R.; FU, K.. Tomografia computadorizada multidetectores não-contrastada na avaliação do abdome agudo: um novo paradigma no pronto-socorro. *Radiol Bras*, 2006, 39.2.
- MIYAGI, P.E.. *Introdução à Simulação Discreta*. São Paulo (SP), 2006. (Apostila da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos).
- NEUSOFT MEDICAL SYSTEMS. <http://www.neusoft.com>. Acessado em 16 de março de 2016.
- NISKA, R., BHUIYA, F., XU, J. (2010). National hospital ambulatory medical care survey: 2007 emergency department summary. *Natl Health Stat Report*, 26(26), 1-31.

- NUTARO, J.J.. *Building software for simulation: theory and algorithms, with applications in C++*. John Wiley & Sons, 2011.
- OGATA, K.. Engenharia de controle moderno. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- OLIVEIRA, J., GIRARD, A.C., MEDEIROS, A.A., NASCIMENTO, N.F.S. (2014). Satisfação e Percepção dos Usuários de uma Unidade Básica de Saúde da Família Sobre o SUS. *Cadernos de Educação, Saúde e Fisioterapia*, 1.1.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD), 2011. <http://www.oecd-ilibrary.org/>. Acessado em 14 de agosto de 2016.
- PEREIRA, G. H. (2000). *A Manutenção da Produção* (Monografia do curso de MBA em Gerência Empresarial. Taubaté (SP): Universidade de Taubaté).
- PHILIPS HEALTHCARE. <http://www.usa.philips.com/healthcare/country-selector>. Acessado em 15 de março de 2016.
- PIDD, M.. *Modelagem Empresarial: Ferramentas para tomada de decisão*. Tradução de Gustavo Severo de Borba et al. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.
- RAMIS, F.J., BAESLER, F. F., BERHO, E., NERIZ, L., SEPÚLVEDA, J. A.. *A simulator to improve waiting times at a Medical Imaging Center*. Winter Simulation Conference 2008: pág. 1572-1577. EUA.
- RIEGER, M., CZERMAK, B., EL ATTAL, R., SUMANN, G., JASCHKE, W., FREUND, M.. *Initial Clinical Experience with a 64-MDCT Whole-Body Scanner in an Emergency Department: Better Time Management and Diagnostic Quality?* Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care: 2009 – V. 66:3 - pp 648-657.
- SAKURADA, N., MIYAKE, D.I.. "Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços." *Gestão & Produção* 16.1 (2009): 25-43.
- SAMSUNG HEALTHCARE. <https://www.samsunghealthcare.com/en/products>. Acessado em 13 de dezembro de 2018.
- SANTOS, M. P. (1999). Introdução à simulação discreta. *Rio de Janeiro: UERJ*.
- SANTOS, R.P., ALMEIDA, R.M.V.R., PEREIRA, W.C.A., COELLI, F.C., MAMEDE, M.. *Fluxo de Pacientes e Tempos de Exame em um Serviço de PET/TC em Implantação em um Hospital Oncológico*. In: XXII Congresso Brasileiro em Engenharia Biomédica, 2010, Tiradentes. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica 2010. Rio de Janeiro: SBEB, 2010. v. 11. p. 853-856.
- SANTOS, R.P., ALMEIDA, R.M.V.R., PEREIRA, W.C.A., COELLI, F.C.. *Simulação por Eventos Discretos Aplicada a um Serviço de PET/TC em um Hospital*

- Oncológico*. In: Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica – CBEB 2012. p. 853-6, 2012.
- SANTOS, R.P., ALMEIDA, R.M.V.R., COELLI, F.C., PEREIRA, W.C.A.. *Comparação entre a produtividade de um tomógrafo computadorizado de um canal e outro de quatro*. In: XXIV Congresso de Engenharia Biomédica - CBEB 2014, Uberlândia. Anais do XXIV Congresso de Engenharia Biomédica, 2014.
- SANTOS, R.P., PIRES, A.L.A., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R. (2019). *Computer Simulation in the Analysis of Computed Tomography Exam Times*. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018* (pp. 661-664). Springer, Singapore.
- SANTOS, R.P., PIRES, A.L.A., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R. (2019). *Computer simulation as a tool in the definition of Computed Tomography acquisition characteristics*. In *XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering 2018* in press. Springer, Singapore.
- SCHWARTZ, T.D., FERREIRA, J.T.B., MACIEL, E.L.N., LIMA, R.D.C.D. (2010). *Estratégia Saúde da Família: avaliando o acesso ao SUS a partir da percepção dos usuários da Unidade de Saúde de Resistência, na região de São Pedro, no município de Vitória (ES)*. *Ciênc. Saúde coletiva*, 15(4), 2145-2154.
- SEERAM, E.. *Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control*. 4th ed. St Louis, MO: Elsevier Health Sciences. 2015.
- SENDI, P.; MAIWENN J.A.; BATTEGAY, M.. 2004. *Optimizing the performance of an outpatient setting*. *Swiss Medical Weekly* 134:44-49.
- SHAKOOR, M. (2015). *Using discrete event simulation approach to reduce waiting times in computed tomography radiology department*. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, 9(1), 177-181.
- SHANNOUN, F., PEREZ, M., PENDSE, N., BERUMEN, A.V., FAHLGREN, B., GROTH, S., DEVENTER, E.V. (2009). *WHO's Role in the Assessment of Medical Radiation Exposures and Devices*. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009, Munich, Germany* (pp. 498-501). Springer Berlin Heidelberg.
- SHIMADZU MEDICAL SYSTEMS. <http://www.shimadzu.com/med/index.html>. Acessado em 14 de março de 2016.

- SIEMENS HEALTHCARE. <http://www.healthcare.siemens.com/>. Acessado em 14 de março de 2016.
- SOARES, F. M. (2018). *Aplicação prática de métodos de sintonia de controladores PID em uma planta didática industrial*. (Monografia da graduação em Engenharia de Controle e Automação. Ouro Preto (MG): Universidade Federal de Ouro Preto).
- STROPARO, J.R.; BICHINHO, G.L.; PROTIL, R.M.. Estudo da taxa de ocupação do centro cirúrgico através da modelagem e simulação de sistemas, 2004. *IX Congresso Brasileiro de Informática em Saúde*, Ribeirão Preto, Brasil.
- 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.
- TOSHIBA MEDICAL SYSTEMS. <http://www.toshibamedicalsystems.com/>. Acessado em 16 de Março de 2016.
- TRAVASSOS, P.C.B., BELEM, V.R., MAGALHÃES, L.A., ALMEIDA, C.E.A. (2014). Avaliação da Qualidade dos Tomógrafos do Estado do Rio de Janeiro. *Crânio*, 53, 3.
- UZIAŁKO-MYDLIKOWSKA, J. e MIELCZAREK, B.. *Application of computer simulation modeling in the health care sector: a survey*. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 2012; 88(2): 197–216.
- VAN LENT, W.A.M. et al. "Reducing the throughput time of the diagnostic track involving CT scanning with computer simulation." *European journal of radiology* 81.11 (2012): 3131-3140.
- VACCARO, G.L.R. *Modelagem e Análise de Dados em Simulação*. Exame de Qualificação (Doutorado). PPGC/UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- VILLAMIZAR, J.R., COELLI, F.C., PEREIRA, W.C.A., ALMEIDA, R.M.V.R.. Discrete-event computer simulation methods in the optimization of a physiotherapy clinic, 2011. *Physiotherapy*, 97(1), 71-77.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 2011. Density of computed tomography units. <http://tinyurl.com/j33eh9a>. Acessado em 14 de Agosto de 2016.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). 2013. Development of medical Devices Policies. Geneva, Switzerland.
- ZHANG, L., HEFKE, A., FIGIEL, J., SCHWARZ, U., ROMINGER, M., & KLOSE, K. J. (2011). Enhancing same-day access to magnetic resonance imaging. *Journal of the American College of Radiology*, 8(9), 649-656.



## APÊNDICE A

### Tempos medidos dos processos nos tomógrafos computadorizados

Nas tabelas subsequentes, a sigla NM se refere à um item Não Medido.

#### TCs de 1 corte

Nas tabelas 22 e 23, as etapas dos exames são:

1. Entrada do Paciente;
2. Preparação do paciente;
3. Posicionamento do Paciente;
4. Entrada de dados;
5. Aquisição 1;
6. Reposicionamento do Paciente/Mudança de Protocolo;
7. Aquisição 2;
8. Saída do paciente.

**Tabela 22:** Tempos medidos e calculados no TC Xvision/EX. \*

	Tempos das Etapas dos Exames								
	TC Toshiba Xvision/EX								
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Coluna Lombar	8"	2'44"	1'22"	1'42"	18'20"	-	-	2'29"	26'47"
Coluna Lombar	7"	55"	1'39"	53"	12'47"	-	-	01'03"	17'26"
Coluna Lombar	44"	1'13"	1'19"	1'58"	8'43"	-	-	2'41"	16'39"
Crânio	1'49"	6'50"	2'07"	1'15"	4'26"	-	-	1'37"	18'07"
	Estatísticas (TC Xvision/EX)								
Mínimo	7"	55"	1'19"	53"	4'26"	-	-	1'03"	8'46"
Máximo	1'49"	6'50"	2'07"	1'58"	18'20"	-	-	2'41"	33'46"
Média	42"	2'55"	1'36"	1'27"	11'04"	-	-	1'58"	19'45"
Desvio Padrão	41"	2'21"	19"	24"	5'07"	-	-	39"	4'06"

\*mínimos, máximos, médios e desvios padrão em minutos e segundos.

**Tabela 23:** Tempos medidos e calculados nos TCs de 1 corte estudados. \*

	TC Toshiba Asteion								
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Crânio	NM	NM	1'41"	1'18"	2'33"	-	-	1'03"	6'36"
Crânio	NM	3'01"	2'40"	2"	2'15"	-	-	3'27"	11'27"
Coluna Lombar	NM	27"	1'16"	2'12"	4'01"	-	-	1'40"	9'38"
Abdome e Pelve	48"	28"	38"	38"	6'16"	-	-	1'03"	9'52"
Crânio	NM	1'24"	1'46"	50"	5'06"	-	-	1'43"	10'50"
Mastoide	NM	1'19"	1'07"	59"	4'00"	2'42"	4'32"	1'21"	16'00"
Coluna Lombar	NM	1'12"	38"	55"	1'24"	-	-	1'00"	5'11"
Coluna Lombar	19"	3'17"	55"	57"	1'48"	-	-	3'39"	10'38"
Abdome e Pelve	NM	2'50"	42"	41"	2'30"	-	-	3'29"	10'14"
	<b>Estatísticas (Todos TCs de 1 corte estudados)</b>								
Mínimo	7"	27"	38"	0	1'24"	-	-	1'00"	3'37"
Máximo	1'49"	6'50"	2'40"	2'42"	18'20"	-	-	3'39"	36'01"
Média	39"	2'08"	1'22"	1'08"	5'37"	-	-	2'01"	13'02"
Desvio Padrão	35"	1'42"	34"	40"	4'34"	-	-	57"	5'33"
	<b>Estatísticas (TC Asteion)</b>								
Mínimo	19"	27"	38"	2"	1'24"	-	-	1'	3'52"
Máximo	48"	3'17"	2'40"	2'42"	6'16"	-	-	3'39"	19'23"
Média	34"	1'45"	1'16"	1'08"	3'27"	-	-	2'03"	10'04"
Desvio Padrão	14"	1'04"	38"	44"	1'30"	-	-	1'04"	2'52"
<b>Valor da Aquisição Ajustado</b>					0,269+L(3,73; 2,27)				

\* Tempos medidos, mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames nos TCs de 1 corte (Xvision e Asteion juntos e separados), em minutos e segundos. Tempo da etapa "Aquisição" dos TCs Asteion ajustado à distribuição de probabilidade no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

## TCs de 2 cortes

Nas tabelas de 24 a 26, as etapas dos exames são:

1. Entrada do Paciente;
2. Preparação do paciente;
3. Posicionamento do Paciente;
4. Entrada de dados;
5. Aquisição 1;
6. Aplicação de Contraste;
9. Reposicionamento do Paciente/Mudança de Protocolo;
7. Aquisição 2;
8. Saída do paciente.

**Tabela 24:** Tempos medidos e calculados no TC Emotion de 2 cortes. \*

Tempos das Etapas dos Exames										
TC Siemens Emotion										
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
Crânio	NM	NM	2'50"	1'01"	3'04"	2'02"	-	1'07"	4'28"	14'35"
Tórax	NM	7'21"	1'55"	1'06"	2'14"	-	14"	1'49"	3'03"	17'44"
UroTC	NM	32'01"	1'50"	1'21"	2'02"	-	-	-	2'30"	39'46"
UroTC	NM	3'20"	2'20"	1'47"	2'00"	-	-	-	6'00"	15'28"
UroTC	NM	2'20"	1'01"	2'17"	2'24"	-	-	-	1'31"	9'33"
UroTC	NM	1'20"	2'54"	0'48"	1'59"	-	-	-	1'38"	8'40"
Estatísticas (TC Siemens Emotion)										
Mínimo	NM	1'20"	1'01"	48"	1'07"	-	-	-	1'31"	5'48"
Máximo	NM	32'01"	2'54"	2'17"	3'04"	-	-	-	6'	46'17"
Média	NM	9'16"	2'08"	1'23"	2'05"	-	-	-	3'12"	17'38"
Desvio Padrão	NM	11'33"	38"	30"	31"	-	-	-	1'35"	10'24"

\* Tempos medidos, mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames no TC Emotion de 2 cortes, em minutos e segundos.

**Tabela 25:** Tempos medidos e calculados nos TCs de 2 cortes estudados. \*

<b>Estatísticas (TC Siemens Emotion) sem Outlier</b>										
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>Total</b>
<b>Mínimo</b>	NM	1'20"	1'01"	48"	1'07"	-	-	-	1'31"	5'48"
<b>Máximo</b>	NM	3'20"	2'54"	2'17"	3'04"	-	-	-	6'	17'36"
<b>Média</b>	NM	2'20"	2'16"	1'24"	2'05"	-	-	-	3'12"	11'18"
<b>Desvio Padrão</b>	NM	49"	38"	30"	31"	-	-	-	1'35"	49"
<b>TC Philips MX-4000</b>										
<b>Região</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>Total</b>
<b>Coluna Lombar</b>	NM	26"	1'26"	50"	2'58"	-	-	-	1'09"	6'48"
<b>Coluna Lombar</b>	NM	1'54"	1'22"	NM	3'13"	-	-	-	3'33"	10'01"
<b>Abdome</b>	NM	43"	1'53"	1'52"	2'48"	-	-	-	2'04"	9'14"
<b>Abdome</b>	NM	24"	2'29"	1'44"	4'31"	-	-	-	3'20"	12'28"
<b>Abdome e Pelve</b>	38"	1'57"	1'33"	30"	2'59"	-	-	-	1'55"	9'32"
<b>Abdome e Pelve</b>	NM	1'27"	1'14"	-	2'35"	-	-	-	1'38"	6'55"
<b>Abdome e Pelve</b>	55"	2'30"	1'29"	-	3'20"	-	-	-	2'20"	10'32"
<b>Abdome Total e Tórax</b>	27"	4'05"	1'51"	17"	4'07"	-	-	4'53"	4'26"	20'05"
<b>Pescoço e Seios da Face</b>	NM	2'06"	1'42"	-	2'30"	-	45"	4'07"	2'56"	14'06"
<b>Crânio e Seios da Face</b>	NM	2'06"	1'40"	-	2'29"	-	-	1'54"	1'09"	9'18"
<b>Estatísticas (TC Philips MX-4000)</b>										
<b>Mínimo</b>	27"	24"	45"	17"	1'54"	-	-	-	1'09"	4'56"
<b>Máximo</b>	55"	4'05"	2'29"	1'52"	4'54"	-	-	-	4'26"	14'13"
<b>Média</b>	40"	1'46"	1'35"	1'02"	3'15"	-	-	-	2'27"	10'45"
<b>Desvio Padrão</b>	11"	1'03"	25"	39"	52"	-	-	-	1'02"	3'43"

\* Tempos medidos, mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames nos TCs de 2 cortes (Emotion sem outlier e MX-4000, separados), em minutos e segundos.

**Tabela 26:** Tempos calculados nos TCs de 2 cortes estudados. \*

	Estatísticas (Todos TCs de 2 cortes estudados)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
<b>Mínimo</b>	27"	24"	45"	14"	1'07"	-	-	-	1'09"	4'06"
<b>Máximo</b>	55"	7'22"	2'54"	2'17"	4'53"	-	-	-	6'	24'21"
<b>Média</b>	39"	2'19"	1'47"	1'09"	2'49"	-	-	-	2'44"	11'27"
<b>Desvio Padrão</b>	14"	1'44"	36"	40"	58"	-	-	-	1'22"	4'04"
<b>Valor da Aquisição Ajustado</b>					$1+L(1,95; 1,6)$					

\* Tempos mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames nos TCs de 2 cortes juntos, em minutos e segundos. Valor da etapa "Aquisição" ajustado à distribuição de probabilidade no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

## TCs de 4 cortes

Nas tabelas de 27 a 30, as etapas dos exames são:

1. Entrada do Paciente;
2. Preparação do paciente;
3. Posicionamento do Paciente;
4. Entrada de dados;
5. Aquisição 1;
6. Reposicionamento do Paciente/Mudança de Protocolo/Aplicação de Contraste;
7. Aquisição 2;
8. Reposicionamento do Paciente/Mudança de Protocolo;
9. Aquisição 3;
10. Reposicionamento do Paciente/Mudança de Protocolo;
11. Aquisição 4;
12. Saída do paciente.

**Tabela 27:** Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos.

	Tempos das Etapas dos Exames								
	TC Toshiba Asteion4								
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Crânio	21"	12"	38"	1'26"	1'13"	-	-	35"	4'47"
Crânio	26"	15"	24"	1'37"	1'16"	-	-	28"	4'28"
Crânio	44"	1'33"	43"	1'10"	1'16"	-	-	1'04"	6'33"
Crânio	9"	18"	26"	1'18"	1'08"	-	-	32"	3'53"
Crânio	1'24"	49"	59"	54"	1'28"	-	-	2'20"	7'57"
Crânio	6"	1'01"	42"	44"	1'39"	-	-	48"	5'02"
Crânio	20"	33"	1'04"	50"	1'35"	-	-	48"	5'12"
Crânio	20"	2'00"	50"	44"	6'09"	-	-	1'31"	11'34"
Crânio	20"	24"	50"	2'23"	1'30"	-	-	1'03"	6'32"
Crânio	1'15"	1'17"	53"	2'05"	2'10"	-	-	2'53"	10'34"
Crânio	1'24"	40"	12'28"	40"	3'41"	-	-	32"	19'26"

**Tabela 28:** Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos.

<b>Região</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Total</b>
<b>Crânio</b>	21"	37"	38"	44"	1'33"	-	-	1'31"	5'27"
<b>Crânio c/ Contraste</b>	19"	58"	1'36"	1'33"	1'12"	4'30"	54"	3'00"	14'05"
<b>Face</b>	NM	26"	32"	1'13"	1'53"	-	-	NM	4'05"
<b>Face</b>	NM	NM	46"	44"	2'49"	-	-	34"	4'53"
<b>Seios da Face</b>	29"	8"	15"	55"	2'33"	-	-	29"	4'51"
<b>Seios da Face</b>	19"	1'05"	1'12"	42"	2'01"	-	-	1'03"	6'24"
<b>Seios da Face</b>	9"	19"	56"	1'51"	4'34"	-	-	26"	8'18"
<b>Seios da Face</b>	1'17"	10"	1'14"	1'34"	5'03"	-	-	38"	9'58"
<b>Crânio e Seios da Face</b>	14"	21"	28"	1'26"	1'14"	55"	45"	33"	6'00"
<b>Crânio e Seios da Face</b>	6'45"	3'11"	1'05"	1'47"	1'17"	3'24"	2'54"	5'31"	25'58"
<b>Mandíbula</b>	NM	17"	1'25"	4'01"	2'03"	-	-	3'26"	11'13"
<b>Clavícula</b>	34"	52"	32"	1'47"	1'40"	-	-	2'04"	7'33"
<b>Quadril</b>	2'14"	1'00"	1'26"	3'41"	2'24"	-	-	4'17"	15'05"
<b>Coluna Lombar e Dorsal</b>	18"	2'35"	1'31"	1'41"	3'40"	2'19"	2'58"	3'23"	18'29"
<b>Coluna Lombar e Quadril</b>	1'10"	1'02"	55"	1'41"	2'24"	4'06"	48"	2'28"	15'09"
<b>Coluna Lombar</b>	NM	1'35"	1'42"	1'31"	1'26"	1'38"	1'36"	2'06"	11'36"
<b>Coluna Lombar</b>	1'06"	20"	55"	46"	2'21"	-	-	2'12"	6'42"
<b>Coluna Lombar</b>	1'28"	51"	54"	34"	2'39"	-	-	49"	7'16"
<b>Coluna Lombar</b>	2'20"	2'07"	1'07"	46"	2'44"	-	-	5'11"	13'59"
<b>Coluna Lombar</b>	36"	2'05"	1'03"	42"	2'54"	-	-	3'31"	10'54"
<b>Tórax</b>	16'28"	43"	49"	44"	1'38"	-	-	1'57"	22'20"
<b>Tórax</b>	30"	3'25"	1'36"	1'07"	1'00"	-	56"	3'13"	11'50"
<b>Tórax</b>	7'20"	45"	50"	2'19"	1'54"	-	-	1'14"	14'24"

**Tabela 29:** Tempos medidos no TC Asteion 4 de 4 cortes, em minutos e segundos.

<b>Região</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>Total</b>				
<b>Tórax</b>	NM	NM	36"	1'19"	1'54"	-	1'49"	52"	6'31"				
<b>Tórax</b>	9"	22"	24"	1'23"	1'49"	-	-	34"	4'44"				
<b>Tórax</b>	30"	51"	53"	1'17"	1'46"	-	-	2'39"	7'59"				
<b>Tórax</b>	1'00"	6'24"	1'14"	46"	2'03"	-	-	6'02"	17'30"				
<b>Abdome e Pelve</b>	2'48"	7'48"	1'33"	44"	1'42"	-	-	4'35"	19'13"				
<b>Abdome e Pelve</b>	31"	1'30"	3'25"	2'09"	5'49"	-	-	3'04"	16'31"				
<b>Abdome e Pelve</b>	2'57"	1'04"	1'12"	40"	1'44"	-	-	2'11"	9'51"				
<b>Abdome e Pelve</b>	1'15"	2'14"	1'03"	56"	1'56"	-	-	1'49"	9'15"				
<b>Abdome e Pelve</b>	20"	47"	1'00"	39"	1'51"	-	-	2'25"	7'04"				
<b>Abdome e Pelve</b>	19"	1'12"	43"	42"	1'51"	-	-	1'22"	6'12"				
<b>Abdome e Pelve</b>	10"	1'43"	54"	1'05"	1'33"	-	-	2'57"	8'24"				
<b>Abdome e Pelve</b>	10"	1'27"	1'08"	49"	1'49"	-	-	3'53"	9'19"				
<b>Abdome e Pelve</b>	19"	1'25"	53"	39"	1'40"	-	-	2'28"	7'25"				
<b>Abdome e Pelve</b>	21"	31"	40"	1'02"	1'59"	-	-	53"	5'28"				
<b>Abdome e Pelve</b>	25"	59"	35"	1'42"	1'41"	-	-	2'33"	7'58"				
<b>Abdome e Pelve</b>	5'18"	2'16"	1'18"	43"	1'47"	-	-	2'56"	14'19"				
<b>Abdome e Pelve</b>	10"	49"	35"	1'20"	1'50"	-	-	1'08"	5'54"				
<b>Região</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Total</b>
<b>Coluna Cervical e Dorsal</b>	53"	1'24"	48"	1'07"	1'58"	1'18"	2'06"	1'24"	1'27"	1'40"	1'29"	1'20"	16'58"



**Tabela 30:** Tempos calculados nos exames no TC Asteion 4 de 4 cortes. \*

	Estatísticas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
<b>Mínimo</b>	6''	8''	15''	34''	45''	-	-	26''	2'14''
<b>Máximo</b>	16'28''	7'48''	12'28''	6'04''	6'09''	-	-	6'02''	54'59''
<b>Média</b>	1'27''	1'20''	1'20''	1'33''	2'31''	-	-	1'59''	10'10''
<b>Desvio Padrão</b>	2'42''	1'24''	1'43''	1'12''	1'24''	-	-	1'23''	5'10''
<b>Média Decimal</b>	1,45	1,33	1,33	1,55	2,52	-	-	1,98	10,20
<b>DP Decimal</b>	2,70	1,40	1,72	1,20	1,40	-	-	1,38	5,17
<b>Valor da Aquisição Ajustado</b>					-1,33+L(3,11; 0,525)				

\* Tempos mínimos, máximos, médios e desvios padrão dos exames no TC Toshiba Asteion4, em minutos e segundos. Valor da etapa "Aquisição", ajustado à distribuição de probabilidade no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

**Tabela 31:** Exames realizados no TC Toshiba Asteion4 durante 3 meses e suas distribuições percentuais.

Região	1º mês		2º mês		3º mês		Média	
<b>Crânio</b>	157	26,61%	131	23,99%	152	26,16%	146,7	25,63%
<b>Abdome</b>	144	24,41%	136	24,91%	157	27,02%	145,7	25,45%
<b>Pelve</b>	145	24,58%	137	25,09%	157	27,02%	146,3	25,57%
<b>Tórax</b>	36	6,10%	52	9,52%	45	7,75%	44,3	7,75%
<b>Face</b>	58	9,83%	45	8,24%	33	5,68%	45,3	7,92%
<b>Coluna</b>	39	6,61%	28	5,13%	28	4,82%	31,7	5,53%
<b>Pés</b>	2	0,34%	7	1,28%	0	0,00%	3	0,52%
<b>Pescoço</b>	1	0,17%	1	0,18%	5	0,86%	2,3	0,41%
<b>Ombro</b>	2	0,34%	2	0,37%	1	0,17%	1,7	0,29%
<b>Punhos</b>	0	0,00%	2	0,37%	2	0,34%	1,3	0,23%
<b>Joelho</b>	2	0,34%	1	0,18%	1	0,17%	1,3	0,23%
<b>Art. Coxo Femoral</b>	2	0,34%	0	0,00%	0	0,00%	0,7	0,12%
<b>Cotovelo</b>	2	0,34%	0	0,00%	0	0,00%	0,7	0,12%
<b>ATM</b>	0	0,00%	1	0,18%	0	0,00%	0,3	0,06%

**Tabela 32:** Exames realizados no TC Toshiba Asteion4 durante 3 meses e suas distribuições percentuais.

Região	1º mês		2º mês		3º mês		Média	
Laringe	0	0,00%	1	0,18%	0	0,00%	0,3	0,06%
S/Ilíacas	0	0,00%	1	0,18%	0	0,00%	0,3	0,06%
Perna	0	0,00%	1	0,18%	0	0,00%	0,3	0,06%
<b>TOTAL</b>	<b>590</b>	<b>-</b>	<b>546</b>	<b>-</b>	<b>581</b>	<b>-</b>	<b>572,3</b>	<b>-</b>

**Tabela 33:** Tempos calculados nos exames no TC Asteion 4 de 4 cortes. \*

Região	Aquisição				Total			
	Média	Desvio Padrão (DP)	Média Decimal	DP Decimal	Média	Desvio Padrão (DP)	Média Decimal	DP Decimal
<b>Crânio</b>	1'52"	1'15"	1,87	1,27	7'48"	4'24"	7,82	4,40
<b>Abdome e Pelve</b>	2'06"	1'04"	2,10	1,08	9'46"	4'06"	9,77	4,12
<b>Tórax</b>	3'06"	23"	3,10	0,40	13'26"	5'25"	13,43	5,43
<b>Face</b>	2'42"	1'16"	2,72	1,28	6'31"	1'59"	6,53	1,98
<b>Coluna</b>	2'14"	44"	2,25	0,75	12'38"	4'01"	12,63	4,02
<b>Valores de Aquisição Ajustados</b>	<b>Crânio</b>				L(1,42; 0,28)			
	<b>Abdome e Pelve</b>				1+L(0,79; 0,114)			
	<b>Tórax</b>				L(1,64; 0,478)			
	<b>Face</b>				0,75+L(1,59; 0,454)			
	<b>Coluna</b>				-0,365+L(2,67; 0,657)			

\*Médias e desvios padrão dos tempos de Aquisição e Totais dos exames de Crânio, Abdome e Pelve, Tórax, Face e Coluna feitos no TC Asteion4, em minutos e segundos, naturais e decimais. Tempos da etapa de aquisição dos exames do TC de 4 cortes estudado, ajustados a curva de distribuição de probabilidade no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

## TCs de 16 cortes

Nas tabelas 34 e 35, as etapas dos exames são:

1. Entrada do Paciente;
2. Preparação do paciente;
3. Posicionamento do Paciente;
4. Entrada de dados;
5. Aquisição 1;
6. Aplicação de Contraste;
7. Aquisição 2;
8. Saída do paciente.

**Tabela 34:** Tempos medidos nos TCs Activion 16 de 16 cortes, em minutos e segundos.

	Tempos das Etapas dos Exames								
	TCs Toshiba Activion16								
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Crânio	1'03"	13"	34"	1'16"	1'17"	-	-	23"	4'48"
Crânio c/ Contraste	NM	6'12"	1'16"	41"	54"	1'44"	29"	3'28"	14'44"
Crânio c/ Contraste	NM	5'06"	55"	1'16"	1'32"	1'14"	45"	1'43"	12'32"
Coluna Lombar	NM	NM	1'05"	1'09"	2'22"	-	-	2'05"	6'42"
Pé	NM	NM	1'36"	53"	2'14"	-	-	1'07"	5'52"
Perna	NM	15"	1'35"	1'04"	2'58"	-	-	1'15"	7'09"
Abdome e Pelve	NM	31"	37"	1'25"	2'20"	-	-	41"	5'35"
Abdome e Pelve	NM	17"	5'10"	53"	2'20"	1'52"	1'30"	4'09"	16'14"
Angiografia de Crânio, Carótidas e Arco Aórtico	16"	1'40"	3'21"	51"	4'38"	-	-	1'53"	12'41"
Angiografia de Crânio, Carótidas e Arco Aórtico	NM	15"	5'02"	8"	4'11"	-	-	2'49"	12'25"

**Tabela 35:** Tempos calculados nos exames nos TCs Activion 16 de 16 cortes. \*

	Estatísticas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
<b>Mínimo</b>	16"	13"	34"	8"	29"	-	-	23"	2'03"
<b>Máximo</b>	1'03"	6'12"	5'02"	1'25"	4'38"	-	-	4'09"	22'30"
<b>Média</b>	40"	1'49"	1'56"	53"	2'07"	-	-	1'58"	9'22"
<b>Desvio Padrão</b>	33"	2'26"	1'42"	25"	1'15"	-	-	1'13"	7'34"
<b>Valor da Aquisição Ajustado</b>	-2,76+L(4,38; 0,631)								

\*Tempos mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames realizados nos TCs Activion16, em minutos e segundos. Valor da etapa "Aquisição" ajustado à distribuição de probabilidade no formato do software MedModel<sup>®</sup>, em minutos decimais.

## TCs de 128 cortes

Na tabela 36 as etapas dos exames são:

1. Entrada do Paciente;
2. Preparação do paciente;
3. Posicionamento do Paciente;
4. Entrada de dados;
5. Aquisição 1;
6. Movimento do Contraste;
7. Aquisição 2;
8. Aquisição 3;
9. Movimento do Contraste;
10. Aquisição 4;
11. Saída do paciente.

**Tabela 36:** Tempos medidos e calculados no TC Somatom128 de 128 cortes. \*

	Tempos das Etapas dos Exames											
	TC Siemens Somatom128											
Região	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
Crânio	NM	24"	29"	46"	1' 37"	-	-	-	-	-	1' 09"	4' 28"
Seios da Face	NM	18"	42"	16"	50"	-	-	-	-	-	1' 10"	3' 19"
Abdome e Pelve	NM	3' 03"	4' 58"	14"	20"	2' 22"	28"	22"	3' 56"	20"	1' 21"	17' 27"
Mastoide	NM	30"	1' 52"	1' 09"	42"	-	-	-	-	-	1' 52"	6' 06"
Coluna Dorsal	NM	44"	34"	54"	1' 53"	-	-	-	-	-	2' 09"	6' 16"
UroTC	NM	15"	1' 08"	38"	35"	-	13"	-	-	-	2' 04"	4' 54"
	Estatísticas											
Mínimo	NM	15"	29"	14"	20"	0	-	-	-	-	1' 09"	2' 29"
Máximo	NM	3' 03"	4' 58"	1' 09"	1' 53"	6' 18"	-	-	-	-	2' 09"	19' 31"
Média	NM	53"	1' 38"	40"	50"	1' 03"	-	-	-	-	1' 38"	7' 05"
Desvio Padrão	NM	59"	1' 34"	19"	32"	2' 20"	-	-	-	-	25"	4' 44"
<b>Valor da Aquisição Ajustado</b>						0,179+L(0,598; 0,88)						

\*Tempos mínimos, máximos, médios e desvios padrão, dos exames no TC Siemens Somatom128, em minutos e segundos. Valor da etapa "Aquisição" ajustado à distribuição de probabilidade no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

## Tempos das etapas (exceto aquisição) ajustados para uso no MedModel®

**Tabela 37:** Tempos ajustados a curva de distribuição de probabilidade das etapas dos exames (exceto a aquisição) de todos TCs estudados. \*

<b>Valores das etapas dos exames de TC, exceto “Aquisição” Ajustados</b>	<b>Entrada do Paciente</b>	$6,47e-002+L(0,619; 0,822)$
	<b>Preparação do Paciente</b>	$0,133+E(1,04)$
	<b>Posicionamento do Paciente</b>	$1,13e-002+L(1,13; 0,62)$
	<b>Entrada de dados</b>	$-1,21+L(2,27; 0,484)$
	<b>Saída do Paciente</b>	$-0,107+L(2,08; 1,4)$

\*no formato do *software* MedModel®, em minutos decimais.

## APÊNDICE B

### Questionários aplicados

#### Imagens e resultados do questionário aplicado no Brasil

**Aquisição de Tomógrafos Computadorizados**

\* 1. Qual a sua Função?

Diretor / Gestor / Empresário

Médico

Físico Médico

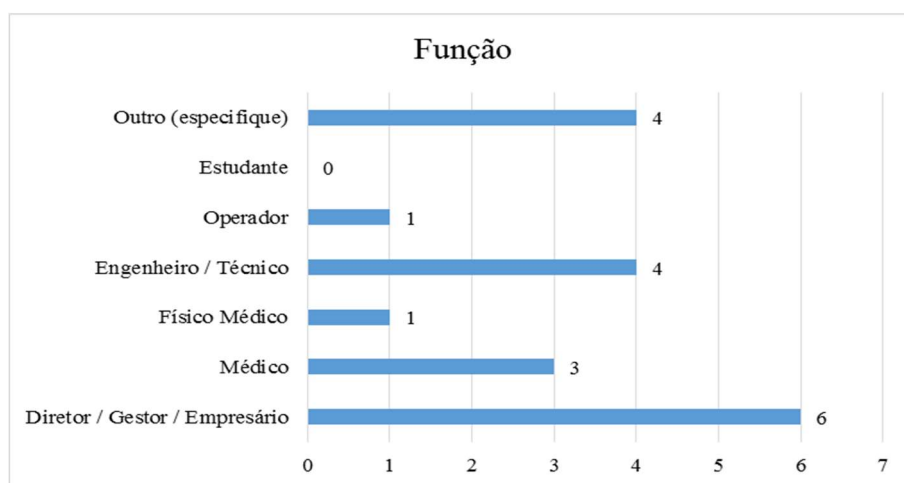
Engenheiro / Técnico

Operador

Estudante

Outro (especifique)

**Figura 12:** Imagem da questão referente à função dos profissionais entrevistados.



**Figura 13:** Função dos profissionais pesquisados.

\* 2. Enumere sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (11)) os fatores que considere importantes no processo de troca/aquisição de um TC numa condição genérica:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Atualidade tecnológica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Capacidade diagnóstica (para exames específicos)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disponibilidade de Peças	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dose de radiação ionizante emitida	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fabricante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilidade/Dificuldade de Manutenção	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produtividade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualidade diagnóstica genérica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valor de aquisição/Condições de pagamento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Outros	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 14: Imagem da questão referente a aquisição inicial/troca de um TC.

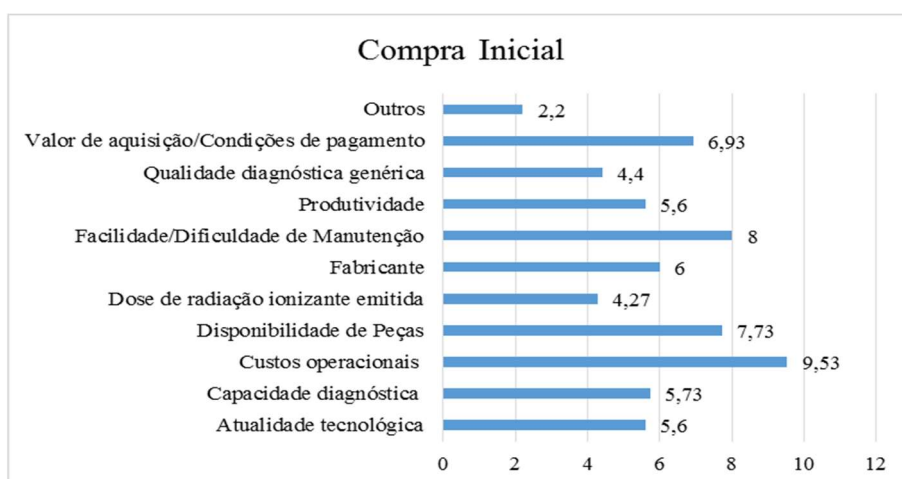


Figura 15: Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na aquisição/troca de TC.



3. Considerando o (a) setor / unidade em que trabalha, em caso de substituição do equipamento de TC atual, considerando suas possíveis limitações, quais características consideraria na escolha de um aparelho substituto? Enumere um ou mais itens sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (11)).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Atualidade tecnológica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Capacidade diagnóstica (para exames específicos)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Disponibilidade de Peças	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Dose de radiação ionizante emitida	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Fabricante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilidade/Dificuldade de Manutenção	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Produtividade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Qualidade diagnóstica genérica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Valor de aquisição/Condições de pagamento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Outros	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 16: Imagem da questão referente a substituição de um TC com o qual o entrevistado atue.

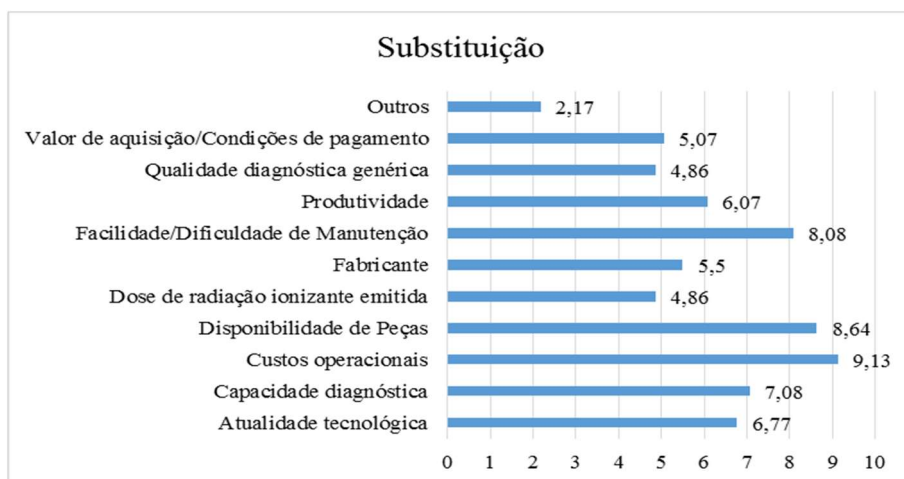
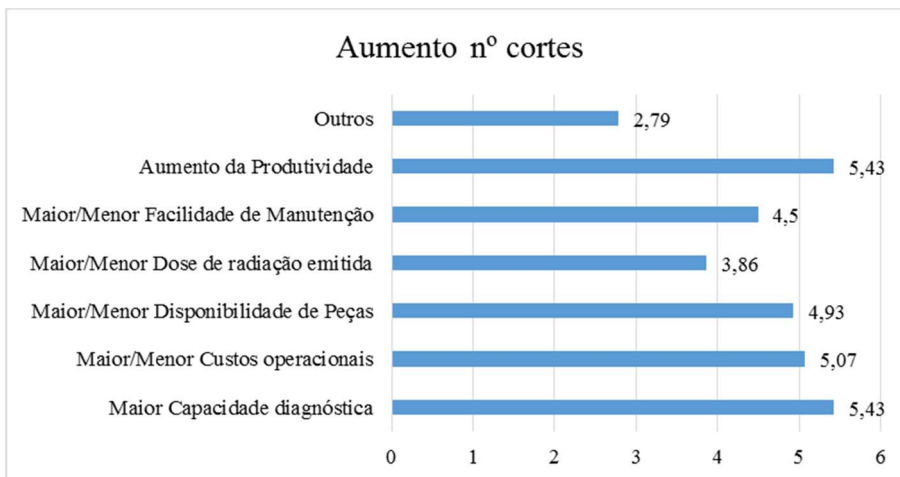


Figura 17: Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na substituição de um TC.

4. O que esperaria obter ao adquirir um tomógrafo multi slice que produza um maior número de cortes por rotação em relação a outro que produza menos cortes? Enumere um ou mais itens sequencialmente (do mais importante (1) ao menos (7)).

	1	2	3	4	5	6	7
Maior Capacidade diagnóstica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Maior/Menor Custos operacionais (consumo, manutenção, peças e partes, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Maior/Menor Disponibilidade de Peças	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Maior/Menor Dose de radiação ionizante emitida	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Maior/Menor Facilidade de Manutenção	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Aumento da Produtividade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						
Outros	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Especifique (Opcional)	<input type="text"/>						


**Figura 18:** Imagem da questão referente à expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos.



**Figura 19:** Resultado expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos.

## Imagens e resultados do questionário aplicado em países estrangeiros

Purchase of Computed Tomography scanner

1. What is your position? 

Director / Manager / Businessman

Medical Doctor

Medical physicist

Engineer / Technician

CT Operator

Student

Other (specify)

Figura 20: Imagem da questão referente à função dos profissionais entrevistados.

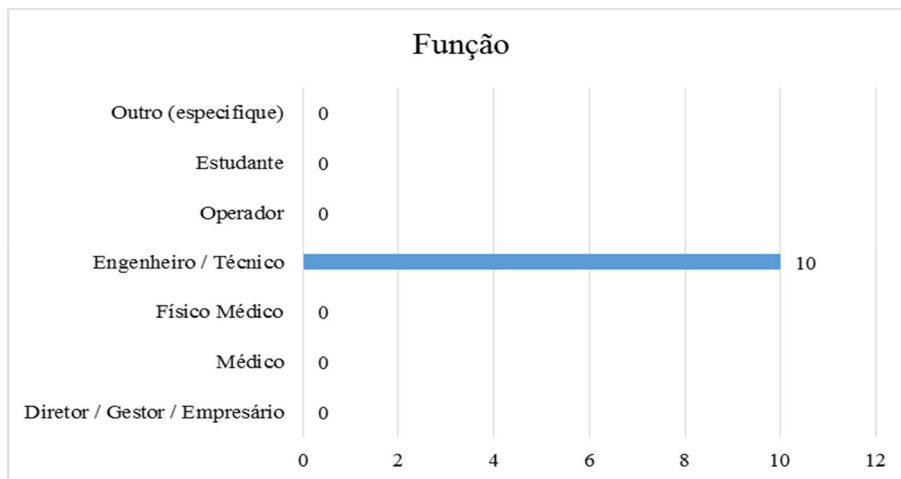

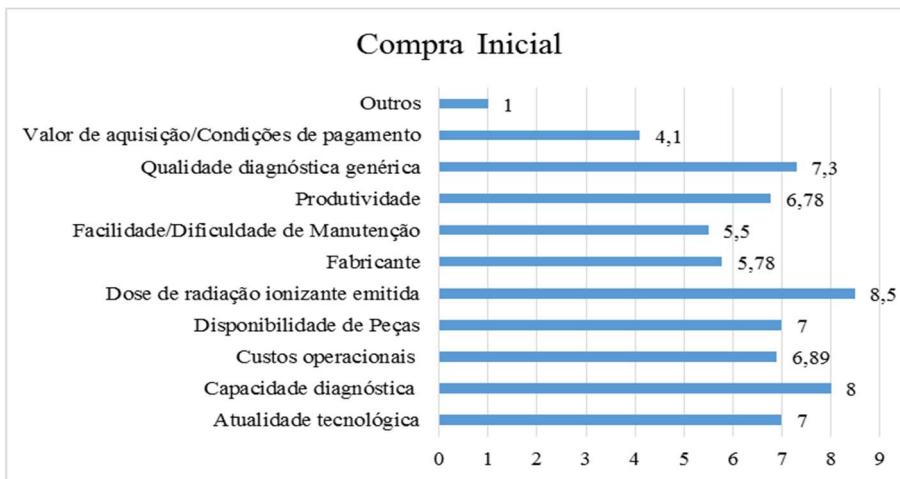


Figura 21: Função dos profissionais pesquisados, em países do exterior.


2. Rank from most important (1) to less important (11) the factors considered important in the process of substitution / acquisition of a CT in a generic situation: 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Technological update	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Diagnostic capability (for specific exams)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Operating costs (consumption, maintenance, parts, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parts Availability	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Radiation dose emitted	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manufacturer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Maintenance Easiness	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Productivity	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Overall diagnostic quality	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Purchase price / Payment conditions	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Other	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Figura 22:** Imagem da questão referente a aquisição inicial/troca de um TC.

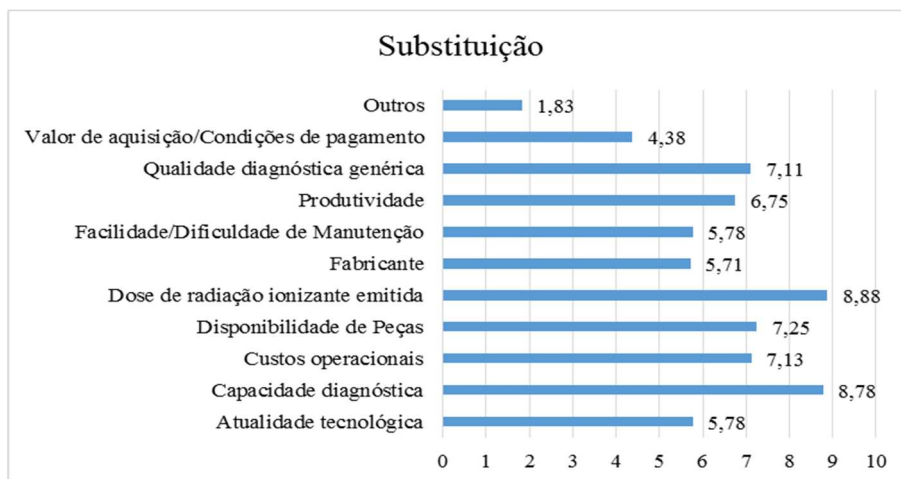


**Figura 23:** Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na aquisição/troca de TC, em países do exterior.

3. Considering your working sector / unit, in case of replacement of the current CT scanner, and considering its possible limitations, what features would you consider when choosing a replacement device? Select and rank one or more items (the most important (1) the less (11)). 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Technological update	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Diagnostic capability (for specific exams)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Operating costs (consumption, maintenance, parts, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Parts Availability	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Radiation dose emitted	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manufacturer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Maintenance Easiness	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Productivity	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Overall diagnostic quality	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Purchase price / Payment conditions	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Others	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Figura 24:** Imagem da questão referente a substituição de um TC com o qual o entrevistado atue.

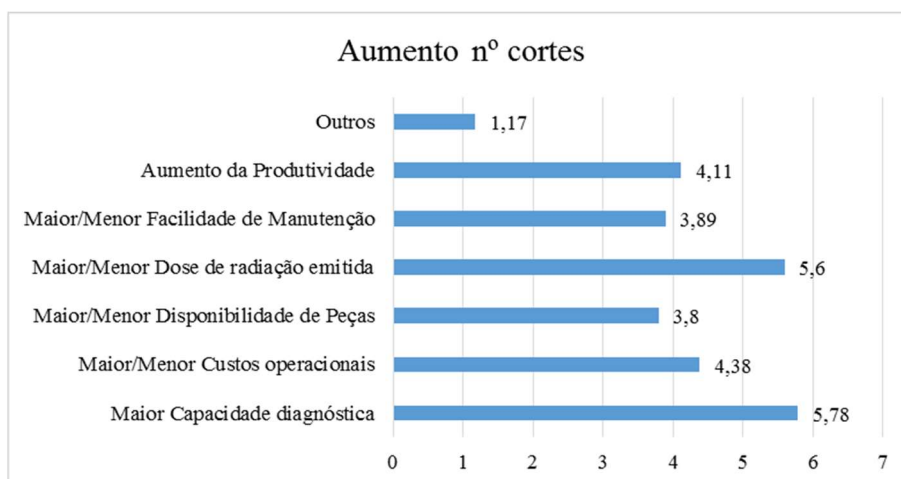


**Figura 25:** Resultado da classificação dos parâmetros considerados mais importantes na substituição de um TC, em países do exterior.

4. What would you expect when purchasing a multi slice CT that produces more slices per revolution in relation to another that produces less slices? Select and rank one or more items (the most important (1) to less (7)).

	1	2	3	4	5	6	7
Increase of diagnostic capacity	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Increase / Decrease of Operating costs (consumption, maintenance, parts, etc.)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Increase / Decrease of parts Availability	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Increase / Decrease of radiation dose emitted	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Increase / Decrease of Maintenance easiness	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Increase Productivity	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						
Others	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Specify (optional)	<input type="text"/>						

**Figura 26:** Imagem da questão referente à expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos.



**Figura 27:** Resultado expectativa quando da troca de um TC por outro que produza mais cortes simultâneos, em países do exterior.

# APÊNDICE C

## Trabalhos Resultantes desta tese

### C.1. Trabalho apresentado no CBEB 2014

#### COMPARAÇÃO ENTRE A PRODUTIVIDADE DE UM TOMÓGRAFO COMPUTADORIZADO DE UM CANAL E OUTRO DE QUATRO

R.P. Santos\*,\*\*, F.C. Coelli\*, R.M.V.R. Almeida\*\*, W.C.A. Pereira\*\*

\*Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) - RJ - UnED Itaguaí, Itaguaí, Brasil

\*\*Programa de Engenharia Biomédica, Instituto Alberto Luiz Coimbra (COPPE),

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil

e-mail: [rogeriopires1@uol.com.br](mailto:rogeriopires1@uol.com.br)

**Resumo:** Os setores de imagem são imprescindíveis no diagnóstico de doenças, e os tomógrafos computadorizados (TC) tornaram-se um dos equipamentos mais importantes desses setores. Este trabalho apresenta o processo de substituição de um TC de um canal por outro de quatro, avaliando o efeito na produtividade do setor. O estudo foi feito em um hospital de médio porte na cidade do Rio de Janeiro que conta com vários aparelhos radiológicos, entre eles, TC e arco cirúrgico. O setor de tomografia funciona ininterruptamente. O processo de execução dos exames foi dividido em seis etapas: chegada do paciente, movimentação deste na sala de exame, posicionamento do paciente, entrada de dados no TC, tempo de exame e tempo até a saída do paciente da sala. Os resultados indicaram uma diminuição dos tempos dos exames feitos no aparelho de quatro canais nas etapas três, quatro e cinco. O tempo médio dos exames estudados caiu de 20:17, no TC antigo para 6:59, no novo. Os tempos de execução dos exames representavam 65% do tempo total no aparelho antigo e passaram a representar pouco mais que 35%. Assim, as outras etapas passaram a ter um peso

maior no tempo total dos exames. A caracterização das diferenças entre as capacidades dos dois equipamentos permitiu uma alteração nos procedimentos de marcação dos exames, adequando-a à tecnologia introduzida e aumentando sua eficiência.

**Palavras-chave:** Tomografia Computadorizada, Produtividade, Multi-Cortes, Agendamento.

**Abstract:** *Radiology and imaging services are now indispensable in disease diagnosis, and Computed Tomographs (CTs) are some of the most important elements of these services. This paper presents the process of replacing a single slice CT by a four-slice model, analyzing the effect of this substitution on the productivity of the service. The study was performed in a private medium-sized hospital in Rio de Janeiro, RJ, Brazil. The hospital image sector had a large number of image equipment, including a CT and a C-arc surgical x-ray, and the sector is open full-time. The exam process was divided into six stages: patient arrival, patient movement inside the exam room, patient positioning, CT data entry, exam duration and time until the patient*

*leaves the room. Results indicated a decrease in exam times with the four slices unit in stages three, four and five. The execution times of the exams accounted for 65% of total time in the old equipment and now represent slightly over 35%. Therefore, other steps now have a larger weight in the total exam time. The characterization of the two equipment capacities allowed for changes in scheduling procedures, adjusting these procedures to the new technology and thus, maximizing its efficiency.*

**Keywords:** *Computed Tomography, Productivity, Multi-Slice, Scheduling.*

### **Introdução**

Os setores de radiologia ou, de forma mais geral, de imagem, são atualmente imprescindíveis no processo de diagnóstico e acompanhamento do tratamento de doenças. Estes setores se tornaram vitais aos hospitais e centros médicos, por sua importância no diagnóstico de um paciente [1]. Normalmente possuem aparelhos de raios X convencionais, ultrassom, mamografia, tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética, sendo estes últimos menos comuns no Brasil. Estes setores normalmente realizam muitos exames, com altos custos na aquisição dos equipamentos e insumos, em mão de obra e manutenção. Logo, os exames também se tornam caros, e grandes volumes de recursos estão envolvidos.

No ano de 2009 no Brasil, de todos os aparelhos médicos dedicados a exames de imagem, 4,74% eram TC (três mil e dezenove aparelhos), ocupando o oitavo lugar em número de aparelhos instalados e o primeiro de alto custo nesta lista. A maioria destes (87,65%) estava instalados em unidades privadas [2].

Os exames de TC, atualmente, são utilizados para análise de quase toda a anatomia humana [3-5], utilizando um feixe de radiação ionizante que transpassa o paciente para produzir sinais elétricos em um detector. Esse detector pode conter uma ou mais, carreiras de sensores: ou canais, que caracterizam o número de cortes

ou imagens simultâneas que o aparelho pode produzir. No caso dos equipamentos estudados, o primeiro possuía uma carreira de sensores (um canal) e o segundo quatro (quatro canais). Os sinais provenientes do detector são enviados para um computador central, que produz imagens seccionais ou reconstruções multi-planares e tridimensionais, por exemplo. Normalmente, a operação dos TC fica a cargo de técnicos, tecnólogos ou médicos. As imagens são obtidas eletronicamente, assim, a impressão em filme é facultativa, sendo, atualmente, comum a análise das imagens em terminais de vídeo documentadas a seguir em papel ou mídia ótica.

Os tempos dos exames, e, por conseguinte, a sua produtividade, variam devido à grande diversidade de áreas examináveis e à velocidade dos aparelhos. Na atualidade, existem à venda no Brasil modelos com aquisição helicoidal de um a trezentos e vinte canais, sendo este último o estado da arte. Assim, existem aparelhos capazes de fazer exames em poucos segundos, sendo a obtenção da imagem uma das etapas mais rápidas do processo. Porém, a maioria dos aparelhos instalados ainda é de helicoidais entre um e quatro canais.

Apesar de, nos últimos anos, ter havido uma ampliação do acesso a esta tecnologia, a demanda por estes exames ainda supera a oferta. Por outro lado, a pressão do mercado pela inserção de aparelhos mais modernos pode levar à ideia simplista de que sua adoção resulta automaticamente em aumento de produtividade. Assim, o estudo da produtividade de equipamentos torna-se importante para auxiliar na especificação do modelo que melhor supra as necessidades de um serviço. Este trabalho apresenta o processo de substituição do TC de um canal por outro de quatro canais, analisando o efeito desta substituição na produtividade de um setor de TC.

### **Materiais e métodos**

**Cenário da pesquisa** - O estudo ocorreu em um hospital particular de médio porte localizado na cidade do Rio de Janeiro. A unidade conta com ambulatório, três salas cirúrgicas, trinta e quatro leitos de internação, oito



leitos de pequena e média emergência e dez de CTI. O setor de diagnóstico por imagem conta com dois aparelhos de raios X fixos e dois móveis, um mamógrafo, um TC, dois aparelhos de ultrassom, um de ecocardiografia e um arco cirúrgico. O setor de TC funciona vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana, com sete técnicos/tecnólogos em radiologia. A unidade estava trocando o seu TC antigo de um canal por outro mais novo de quatro canais, também usado. A pesquisa ocorreu no momento de transição entre os dois aparelhos.

**Os aparelhos** – Como dito, o aparelho substituído possuía tecnologia de aquisição helicoidal, com um corte por rotação (*single-slice* ou 1 corte) e tempo máximo de rotação de um segundo (velocidade máxima de rotação do tubo = 1 rotação/segundo). Esse aparelho foi fabricado em 1998 e instalado na unidade no ano de 2002, e sempre esteve coberto por contrato de manutenção. O aparelho apresentava limitações diagnósticas que levavam à não solicitação de alguns exames, este também não possuía suporte ao protocolo de comunicação DICOM e o setor imprimia as imagens em filme de TC comum, com revelação em máquinas reveladoras de filmes de raios X.

O aparelho instalado foi um TC fabricado em 2006 e totalmente reformado, com tecnologia de aquisição helicoidal de quatro canais (*multi-slice* ou multi cortes, no caso, quatro) e tempo máximo de rotação de 0,75 segundo (velocidade máxima de rotação do tubo  $\approx$  1,33 rotação/segundo), comunicação DICOM e uma estação de trabalho (*workstation*) própria, podendo ser operado por dois profissionais simultaneamente (o primeiro fazendo a aquisição das imagens e o segundo visualizando-as, fazendo reconstruções ou imprimindo exames). Foram instalados, ainda, outra *workstation* com gravador de DVD e uma impressora de papel A3 laser colorida. Assim, a unidade mudou os métodos de documentação dos exames para papel fotográfico e gravações em mídia ótica (opções mais econômicas que a original).

**Processo de Exame** - Durante duas tardes (primeira visita, *single-slice*; segunda, *multi-slice*) os exames de TC foram acompanhados, as etapas do processo foram caracterizadas e seus tempos medidos.

**As etapas** - O processo de execução do exame de tomografia foi caracterizado em seis etapas e os seus tempos de execução medidos:

1. Chegada da guia até a entrada do paciente na sala;
2. Entrada do paciente até seu posicionamento;
3. Posicionamento do paciente até a entrada de dados no computador do aparelho;
4. Entrada dos dados até o início do exame;
5. Tempo entre o início e o fim do exame (tempo do exame);
6. Tempo entre o fim do exame e a saída do paciente.

As etapas três, quatro e cinco referem-se diretamente ao aparelho, representando, respectivamente, maior facilidade de posicionamento do paciente, de inserção de dados e maior rapidez na execução do exame propriamente dito. As outras etapas referem-se ao processo de entrada e saída do paciente da sala.

Para cada etapa, foram calculados os tempos médios e os desvios-padrões de todos os exames. Para fins de estudo de produtividade foram observados os tempos globais dos exames, mas para uma comparação mais específica do desempenho dos aparelhos. Apesar da pouca quantidade, o tipo de exame que mais ocorreu nas duas visitas foi o de coluna lombar, assim, as análises focaram-se nestes.

**Tempos mínimos / máximos para os exames de coluna lombar:** foi utilizada a metodologia proposta em [7] e [9], que consiste, basicamente, em computar os menores e os maiores tempos de cada etapa para projetar os tempos mínimos (melhor cenário) e máximos (pior cenário) dos exames, respectivamente. Assim é possível supor quais seriam, idealmente, os tempos mínimos e máximos do processo de exame de coluna lombar. Essa

estimação foi realizada para cada um dos aparelhos analisados.

## Resultados

Foram avaliados sete exames, quatro na primeira visita e três na segunda. Na primeira visita o primeiro

exame foi de crânio e os demais de coluna lombar, e na segunda, o segundo exame foi de tórax e os outros de coluna lombar. Não foi utilizado meio de contraste oral ou intravenoso. Na Tabela 1 estão indicados os tempos medidos nas duas visitas (minutos e segundos), assim como a média e o desvio-padrão (dp) de seus tempos.

**Tabela 1:** Tempos de exames medidos, médias e desvios-padrão, em minutos e segundos, relativos a sete exames de TC realizados com dois aparelhos em uma unidade do Rio de Janeiro. Os exames 1, 2, 3 e 4 referem-se a um TC *single-slice* fabricado em 1998, e os demais a um *multi-slice* de 2006.

Etapa	Exame 1	Exame 2	Exame 3	Exame 4	Média	dp	Exame 5	Exame 6	Exame 7	Média	dp
1	1'49"	8"	7"	44"	42"	41"	1'28"	7'20"	1'06"	3'18"	2'51"
2	6'50"	2'44"	55"	1'13"	2'55"	2'21"	51"	45"	20"	39"	13"
3	2'07"	1'22"	1'39"	1'19"	1'37"	19"	54"	50"	55"	53"	02"
4	1'15"	1'42"	53"	1'58"	1'27"	24"	34"	2'19"	46"	1'13"	47"
5	4'26"	18'20"	12'47"	8'43"	11'04"	5'07"	2'39"	1'54"	2'21"	2'18"	18"
6	1'37"	2'29"	1'03"	2'41"	1'58"	39"	49"	1'14"	1'12"	1'05"	11"
<b>Total</b>	<b>18'07"</b>	<b>26'47"</b>	<b>17'26"</b>	<b>16'39"</b>	<b>19'45"</b>	<b>4'06"</b>	<b>7'16"</b>	<b>14'24"</b>	<b>6'42"</b>	<b>9'27"</b>	<b>3'30"</b>

Observa-se uma diminuição dos tempos dos exames feitos no aparelho de quatro canais nas etapas três, quatro e cinco, que se referem diretamente ao aparelho. Pôde-se observar, também, uma diferença de procedimento por parte dos operadores no que se refere à arrumação da sala, antes ou depois dos exames, que se

reflete nos tempos das etapas 1 e 6. Entre as duas visitas houve uma diminuição dos tempos médios globais de 19'45" para 9'27". Os tempos para os exames de coluna lombar são apresentados na Tabela 2, junto dos tempos médios, os desvios-padrão e a contribuição percentual de cada etapa para o tempo total do processo (Contr).

**Tabela 2:** Tempos de exames de coluna lombar medidos, médias e desvios-padrão, em minutos e segundos, relativos a cinco exames de TC realizados com dois aparelhos em um hospital do Rio de Janeiro. Os exames 2, 3 e 4 referem-se a um TC *single-slice* de 1998, e os demais a um *multi-slice* de 2006.

Etapa	Exame 2	Exame 3	Exame 4	Média	dp	Contr (%)	Exame 5	Exame 7	Média	dp	Contr (%)
1	8"	7"	44"	19"	17"	1'64	1'28"	1'06"	1'17"	11"	18'43
2	2'44"	55"	1'13"	1'37"	47"	8'02	51"	20"	35"	15"	8'51
3	1'22"	1'39"	1'19"	1'26"	8"	7'14	54"	55"	54"	0"	13'01
4	1'42"	53"	1'58"	1'31"	27"	7'51	34"	46"	40"	6"	9'68
5	18'20"	12'47"	8'43"	13'16"	3'56"	65'43	2'39"	2'21"	2'30"	8"	35'92
6	2'29"	1'03"	2'41"	2'05"	43"	10'26	49"	1'12"	1'00"	11"	14'46
<b>Total</b>	<b>26'47"</b>	<b>17'26"</b>	<b>16'39"</b>	<b>20'17"</b>	<b>4'36"</b>		<b>7'16"</b>	<b>6'42"</b>	<b>6'59"</b>	<b>0'17"</b>	

Nota-se que a diferença entre os tempos médios dos exames ficou maior entre os aparelhos (20'17" no antigo e 6'59" no novo). Os tempos de execução dos exames que representavam 65% do tempo total do processo aproximadamente, passando a representar pouco mais que 35%. Assim, as outras etapas passaram a ter uma

maior importância sobre o tempo total dos exames. Finalmente, os tempos mínimos/máximos para os exames de coluna lombar foram estimados como 13'02"/28'07" (*single-slice*) e 6'06"/7'52" (*multi-slice*).

## Discussão

Este estudo avaliou as alterações de produtividade obtidas pela introdução de um aparelho de TC mais moderno (*multi-slice*) em uma unidade de saúde. Com um aparelho mais rápido, obviamente era esperado um aumento da capacidade de execução de exames do setor, porém, a questão fundamental, motivadora da presente análise foi: qual acréscimo de produtividade pode-se realmente esperar com a troca de um TC de um canal por outro de quatro canais? Esta dúvida enfatiza a importância do estudo dos tempos de execução dos exames para se definir qual o melhor tipo de aparelho para as necessidades de uma unidade.

A literatura de Engenharia Clínica cita que os parâmetros que devem ser analisados com fins de substituição de equipamentos biomédicos são: tempo de uso e condição, nível de utilização, aceitabilidade clínica, estado da tecnologia, disponibilidade de peças, custo de manutenção e confiança projetada [6]. No caso de equipamentos de TC, as razões que levam uma unidade a optar por sua substituição são, basicamente: qualidade diagnóstica, produtividade, dose aplicada ao paciente e questões de ordem técnica (número de falhas e dificuldade de reposição de peças, por exemplo).

Como os TC podem examinar áreas diferentes da anatomia, os tempos dos exames também podem diferir marcadamente. Assim, quando os tempos são medidos deve-se levar em consideração o tipo de exame feito. Logo, os tempos médios serviram para a alteração na política de agendamento, mas não para a comparação direta de velocidade, e optou-se também por estudar somente os exames de coluna lombar por terem ocorrido em maior quantidade nos dias da pesquisa. Além destas diferenças é preciso ressaltar os problemas ocorridos durante as medidas. No segundo exame da primeira série, como o operador não estava obtendo uma boa imagem este alterou a técnica de exame (aumentou a corrente do tubo, o mA, e conseqüentemente, a potência do exame), o que provocou um problema no aparelho e atrasou a execução do mesmo [etapa 5]. No segundo exame da segunda série, o operador demorou a

encontrar o paciente na sala de espera [etapa 1]. Assim, os tempos destes exames aumentaram visivelmente. Se estes vieses forem desconsiderados, os tempos dos dois exames tenderão para a média dos demais. Nos outros exames da segunda série, a primeira etapa (chegada da guia até a entrada do paciente) também foi mais demorada, o que pode ser atribuído a problemas de encaminhamento, recepção de pacientes ou de procedimentos do operador. Deve-se observar que o estudo objetivou avaliar a produtividade global do sistema relativamente ao equipamento utilizado. Assim, para um melhor entendimento de suas limitações e possibilidades, foi preciso analisar detalhadamente o comportamento de todas as etapas do exame.

Comparando-se os tempos medidos com os dois aparelhos pode-se observar que o fato do aparelho produzir quatro imagens simultâneas não significa que ele será quatro vezes mais rápido que o que produz somente uma. Visto isso, com a observação de que as etapas não relacionadas com o desempenho do equipamento tornam-se mais importantes no tempo total dos exames, pode-se inferir que, mesmo que o tempo de exame fosse *zero* ainda assim não se conseguiria diminuir o tempo do processo sem alterações, por exemplo, nas rotinas de preparo do paciente. Com tal objetivo, um estudo de simulação computacional [7-10] poderia ser feito, no intuito de alterar-se estes processos, produzindo um aumento da eficiência das etapas não dependentes do aparelho. Outra opção é o teste empírico de mudanças, como feito por [11] também em um setor de TC.

Como esperado, as etapas 3, 4 e 5 foram as que mais tiveram seus tempos diminuídos, pois referem-se diretamente ao equipamento. As etapas 3 e 4 referem-se à facilidade de operação inerente aos sistemas mais modernos, principalmente no caso da etapa 4, na qual programas mais, amigáveis, tornam a operação mais intuitiva e rápida. Porém, mais uma vez, como esperado, a etapa que mais evoluiu de um aparelho para o outro foi a 5, que se refere à execução do exame propriamente

dito. Neste caso, o tempo médio de exame do aparelho “quatro canais” é pouco mais de um terço do tempo do “um canal”.

Como dito, os tempos mínimos e máximos dos exames de coluna lombar foram estimados como 13’02”/28’07” (aparelho de um canal), e 6’06”/7’52” (quatro canais). Como discutido em [12], esses valores mínimos de tempo podem ser considerados ideais, pois, em cada uma das etapas, utiliza-se o menor tempo medido. Esses valores servem, por exemplo, para a estipulação de metas de produtividade ou mesmo para a determinação da política de agendamento de exames. Anteriormente a unidade agendava os exames, independentemente do tipo, de trinta em trinta minutos, o que, observando-se os dados, no caso de exames de coluna lombar, representa uma super-estimação. Com o aparelho atual, o intervalo poderia ser de dez em dez minutos, pois mesmo o tempo máximo é menor que este intervalo. Assim, com base nos resultados apresentados neste estudo, a unidade optou por diminuir o intervalo entre exames de trinta minutos para quinze. Este procedimento, em princípio, permitiria dobrar a capacidade máxima da unidade, com uma produtividade de até dois mil oitocentos e oitenta exames/mês ou trinta e cinco mil e quarenta exames/ano, considerando-se que o setor funciona ininterruptamente (168 horas/homem trabalhadas - HHT). Esse resultado é superior, por exemplo, ao apresentado em [11], que projetou uma produtividade de 38.740 exames/ano com três técnicos trabalhando 99 horas semanais (297 HHT) com um TC de oito canais e outro de dezesseis. O aumento da qualidade diagnóstica propiciou ainda um aumento do número de exames executados, aumentando, consequentemente, a lucratividade do setor, que passou ainda, como dito, a economizar no método de documentação.

### Conclusão

A introdução de novos equipamentos de TC em um setor de radiologia não deve ser realizada sob uma

expectativa simplista de que o número de exames será multiplicado pelo número de cortes simultâneos do equipamento. Para a estimação efetiva dos ganhos de produtividade, é preciso considerar os tempos envolvidos em todas as etapas do exame, bem como as alterações de rotina que eventualmente devam ser introduzidas.

Apesar do número pequeno de exames e do estudo ter se concentrado em dois dias/dois operadores, os resultados permitiram conclusões significativas sobre o sistema estudado, encorajando estudos que envolvam, por exemplo, técnicas de simulação computacional não-linear, como aplicadas em [7] e [10], onde utilizaram o pacote Medmodel da *softhouse* ProModel. Seria possível, assim, desenvolver ferramentas de apoio à decisão, por exemplo, para a escolha de opções com melhor custo/efetividade para a unidade.

### Agradecimentos

Parte desta pesquisa foi financiada por CAPES (Programa PROEX) e CNPq, a quem agradecemos. Agradecemos aos diretores e gestores da unidade estudada, Drs. Aziz e Lilian e Sra. Adriana.

### Referências

- [1] Ramis, F.J., Baesler, F. F., Berho, E., Neriz, L., Sepúlveda, J. A.. A simulator to improve waiting times at a medical imaging center. In: Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter. IEEE, 2008. p. 1572-1577.
- [2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária – 2009. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); 2009.
- [3] Duarte, A.F., Soler, R.C., Zavarezzi, F.. Nasal endoscopy associated with paranasal sinus computerized tomography scan in the diagnosis of chronic nasal obstruction. Revista Brasileira de Otorrinolaringologia, v. 71, n. 3, p. 361-363, 2005.

- [4] Menezes M.R. & Kay F.U.. Tomografia computadorizada multidetectors não-contrastada na avaliação do abdome agudo: Um novo paradigma no pronto-socorro? *Radiol Brás.* 2006;39(2):IV-V.
- [5] Juchem, B.C., Dall'agnol, C.M., Magalhães, A.M.M.D.. Contraste iodado em tomografia computadorizada: prevenção de reações adversas. *Rev Bras Enfermagem*, v. 57, n. 1, 2004.
- [6] Grimes S.L. & Painter F.R.. Equipment Replacement Planning. *Gestão de Tecnologias Médico-Hospitalares e Workshop Engenharia Clínica*, Florianópolis, 2006.
- [7] Coelli, F.C., Ferreira, R.B., Almeida, R.M.V.R., Pereira, W.C.A.. Computer simulation and discrete-event models in the analysis of a mammography clinic patient flow. *Computer methods and programs in biomedicine*, v. 87, n. 3, p. 201-207, 2007.
- [8] Villamizar, J.R., Coelli, F.C., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R.. Discrete-event computer simulation methods in the optimization of a physiotherapy clinic. *Physiotherapy*, v. 97, n. 1, p. 71-77, 2011.
- [9] Ferreira, R.B., Coelli, F.C., Almeida, R.M.V.R., Pereira, W.C.A.. Optimizing patient flow in a large hospital surgical centre by means of discrete-event computer simulation models. *Journal of evaluation in clinical practice*, v. 14, n. 6, p. 1031-1037, 2008.
- [10] Santos R.P., Coelli F.C., Pereira W.C.A., Almeida R.M.V.R. (2012). Simulação por Eventos Discretos Aplicada a um Serviço de PET/TC em um Hospital Oncológico. In: *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica [CBEB:2012]*. p. 853-6.
- [11] Boland G.W.L., Houghton M.P., Marchione D.G., McCormick W.. Maximizing Outpatient CT Productivity: The use of multiple technologists to increase patient throughput and CT capacity. *Journal of American College of Radiology*. 2008; 5: 119-125. EUA.
- [12] Santos R.P, Coelli F.C., Mamede M., Pereira W.C.A., Almeida R.M.V.R. (2010). Fluxo de Pacientes e Tempos de Exame Em Um Serviço de PET/TC em Implantação em um Hospital Oncológico. In: *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica [CBEB:2010]*. p. 592-5.

## C.2. Resumo apresentado no IUPESM 2015

### Low-entry level CT exam times and availability in worldwide markets

R.P. Santos\*, \*\*, A.L.A. Pires\*\*, F.C. Coelli\*, R.M.V.R. Almeida\*\*, W.C.A. Pereira\*\*

\*Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) -

\*\*Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil

**e-mail:** [rogeriopires1@uol.com.br](mailto:rogeriopires1@uol.com.br)

#### Abstract

**Context and background:** Computerized Tomography (CT) is widely used for disease diagnosis and treatment planning. Currently, its state-of-the-art is “320 slices”, but one, two, four and 16 slices are still used in many countries. Exam speed (and, thus, number of exams in a period of time) may change among models, but the smallest slice thickness is usually about 1mm regardless of the number of detector rows. However, most of the basic models already had their production discontinued, a situation that makes CT entry level more expensive, and, therefore, decreases its adoption in less developed countries.

**Objective:** The objective of the present work was to study the differences in productivity (exams/unit of time under real working conditions) between 1, 2, 4 and 16 slices CTs.

**Methods:** Four CTs (with one, two, four and 16-slices) were studied relatively to their performance in patient exam time, divided as: *i)* patient arrival; *ii)* patient initial preparation; *iii)* patient positioning in the equipment; *iv)* data scan; *v)* examination time and *vi)* time for patient departure. Times were measured in minutes and seconds by two researchers with an Android Tablet and a timer application. Equipments were located in Rio de Janeiro city or nearby cities in Brazil, 2013-2014. Additionally, an Internet search was performed among equipment producers trying to identify the supply of the simpler models in the Asian, European and USA markets.

**Results:** A total of 85 exams were followed, and three had to be discarded, one due to equipment failure at the moment of the exam and two due to patient arrival delays. Average times for the arrival / preparation / positioning / scanning / departure stages did not differ markedly. As for the, scan, stage, the average time for the single slice case was 8’38”, as opposed to respectively 2’05”/ 2’31”/ 2’41” for the remaining models.

Concerning model availability, the Internet search identified that few older model options are still available, with the number of slices beginning at, sixteen, among USA and European manufacturers.

**Conclusion:** Despite their wide variations in technology, average time differences among the studied models were small for the “non-examination” stages, indicating that the general (including ergonomic) characteristics of the equipments did not change markedly. Regarding the “scan” stage, however, 2-16 slices models had a similar and clearly better performance relatively to the single-slice model, and, thus, a similar productivity could be achieved with the former models. This is an important consideration, given that productivity is important both for the public health sector (allowing for attending a larger patient population) and for the private sector. Therefore, these models, if still available, could satisfy the demand of many Less Developed Countries, but the Internet search identified that entry level now refers to 16 slices and over. An alternative for keeping low cost models in production would be the development of “upgradeable platforms” by manufacturers, allowing for the acquisition of more simple alternatives that could, with time, be adequately upgraded.

### C.3. Trabalho publicado no Journal of Healthcare Engineering

#### Computed Tomography scanner productivity and entry-level models in the global market

RP Santos<sup>1,2</sup>, ALA Pires<sup>3</sup>, RMVR Almeida<sup>2</sup>, WCA Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) - RJ - UnED Itaguaí, Itaguaí, Brazil

<sup>2</sup> Programa de Engenharia Biomédica, Instituto Alberto Luiz Coimbra (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brazil

#### Abstract

**Objective:** This study evaluated the productivity of computed tomography (CT) models and characterized their simplest (entry-level) models' supply in the world market.

**Methods:** CT exam times were measured in eight health facilities in the state of Rio de Janeiro, Brazil. Exams were divided into six stages: 1. Arrival of patient records to the examination room; 2. Patient arrival; 3. Patient positioning; 4. Data input prior to exam; 5. Image acquisition; and 6. Patient departure. CT exam productivity was calculated by dividing the total weekly working time by the total exam time for each model. In addition, an internet search identified full-body CT manufacturers and their offerings of entry-level models.

**Results:** The time durations of 111 CT exams were obtained. Differences among average exam times were not large, and they were mainly due to stages not directly related to data acquisition or image reconstruction. The survey identified that most manufacturers offer 2- to 4-slice models for Asia, South America, and Africa, and only one offers single-slice models (Asia). In the USA, two manufacturers offer models below 16-slice.

**Conclusion:** Productivity gains are not linearly related to “slice” number. It is suggested that the use of “shareable platforms” could make CTs less expensive, increasing their availability.

**Key words:** Computed Tomography, Productivity, Exam times



## Introduction

Access to modern technology reflects the level of economic development of a nation. At the same time, modern equipment is essential for medical science and clinical diagnosis. Many countries still suffer from a lack of adequate medical equipment, and organizations such as the International Atomic Energy Agency (IAEA), the Pan American Health Organization (PAHO) and the World Health Organization (WHO) support its Member States to increase worldwide access to such technology [1-3].

Computed Tomography (CT) is one of the most important diagnostic tools in medicine, with wide scope for clinical use [4, 5]. In 2009, Brazil had 15.6 CT scanners (CTs) per million people, a density comparable to Canada (14.2) and New Zealand (15.8). However, Brazil's southeastern region had 21.8 CTs per million people, more than Luxembourg (19.7); and its northeastern region had 8.1 CTs per million people, fewer than Tunisia (9.3). Of all medical imaging devices in Brazil in 2009, 4.7% were CTs, ranking eighth in the number of installed devices [6-8].

In the US, the percentage of patients using CTs in emergency departments increased from 2.4% in 1992 to 13.9% in 2007 [9-11]. In 2007, only 0.7% of patients in US emergency departments used magnetic resonance imaging (MRI), underscoring the importance of CT availability.

CTs have increased their diagnostic capability while reducing examination times and radiation doses. At present, the state-of-the-art equipment performs real-time image acquisition with 320 "slices" (cross-sections used for reconstructing an anatomical image) or 640 slices interpolated, allowing for detailed visualization of moving organs. The 16-slice and higher models are recommended for angiographic exams, while more than 64 slices are needed for cardiologic studies. However, the introduction of more modern and expensive technology does not contribute to the cheapening of simpler equipment, leading, instead, to its removal from the market. Additionally, the acquisition of more modern CTs frequently aims at productivity gains [12]. However, while technological advancements increase image quality, this increase may not be cost effective. For instance, some single-slice CTs can analyze 0.8mm anatomical structures, a degree of detail sufficient for many clinical indications in daily practice [13].

This study aimed to compare models, evaluate their productivity, and identify the simplest (entry-level) model CTs offered in the world market, focusing on developing

countries. Taking the results into account, a way to disseminate this equipment is then suggested.

The approach of the present work is that the replacement of simple CT models with more efficient and “sophisticated” ones neither meets the market requirements nor adequately serves the need of people in developing countries. Therefore, this information should be available for medical devices companies hoping that they take into account when making their market analyses and strategies.

## **Materials and methods**

### *Studied devices*

In this study, “productivity” was defined as the number of CT exams per unit of time. To provide a broad overview of the equipment, and considering that even single-slice models are still used in many countries [11], models with one, two, four, 16, and 128 slices were included in the study.

For time measurements, we considered exams conducted using nine devices, from brands A (1, 4, and 16-slice) and B (2 and 128-slice), in eight private health facilities located in four cities of the state of Rio de Janeiro, Brazil (three specialized radiology clinics, one general medicine clinic and four general hospitals). Four single-slice CTs were studied. One was an older model (1998), and the other three represented more modern models from 2003 (one) and 2009 (two CTs). The dual-slice model was manufactured in 2008, the 4-slice model in 2005, the two 16-slice models in 2011, and the 128-slice model in 2014. Given the differences mentioned in their manufacturing years, the single-slice scanners’ processing times were analyzed separately.

### *Measurements*

Exam procedures were divided into: 1. Arrival of patient records to the examination room; 2. Patient arrival; 3. Patient positioning; 4. Data input prior to exam; 5. Image acquisition; and 6. Patient departure.

Time was measured by two researchers using a stopwatch application with a precision of one hundredth of a second. Values were rounded, resulting in measured times in minutes (′) and seconds (″). The average times for and standard deviations of each exam step were calculated from the measured times.

Considering 66 working hours/week (shifts of 12 hours from Monday to Friday and 6 hours on Saturdays, typical for the studied units) and a constant distribution of

exams, productivity was calculated by dividing the weekly working time by the total exam time for each model.

### *Evaluation of the international CT supply*

After obtaining the measured times, an internet search was performed to identify full-body CT manufacturers. Once a manufacturer's site was located, a more detailed search took place, looking for their market entry-level models (the simpler options for each geographical market) and trying to understand the availability of easily accessible devices to poorer countries. This search took place between February and December 2016.

## **Results**

### *Exam Time*

Table 1 presents the averages and standard deviations of the measured exam times, the percentage contribution of each stage, and the maximum weekly productivities. Times between record and patient arrival could not be obtained for the 128-slice model. The number of measured exam times was 15 for the single-slice models, six for the dual-slice, 70 for the 4-slice, 13 for the 16-slice, and seven for the 128-slice model. Except for data acquisition, times were similar for the other stages in the different studied devices. The maximum estimated productivity of the 128-slice model was less than 2.5 times that of the simplest model (1998 single-slice).

**Table 1:** Average and standard deviation (sd) of measured times in CT exam stages, stage percentage contribution (pc), total exam times, and theoretical maximum weekly exam productivities. Times in minutes (') and seconds (").

Exam stage		Single-Slice (All)	Single-Slice (Modern)	Dual- Slice	4- Slice	16- Slice	128- Slice
<b>Arrival</b>	Average	39"	34"	2'02"	1'25"	40"	
	sd	35"	14"	49"	2'43"	23"	-
	pc	5.00	5.55	19.66	14.26	7.31	
<b>Preparation</b>	Average	2'09"	1'45"	1'30"	1'21"	32"	53"
	sd	1'45"	1'04"	48"	1'24"	31"	59"
	pc	16.50	17.13	7.30	13.11	5.85	15.92
<b>Positioning</b>	Average	1'23"	1'16"	1'50"	1'20"	2'33"	1'38"
	sd	35"	38"	38"	1'43"	1'49"	1'34"
	pc	10.64	12.40	16.85	13.11	27.97	29.43
<b>Data entry</b>	Average	1'09"	1'08"	1'13"	1'34"	56"	40"
	sd	41"	44"	30"	1'13"	22"	19"
	pc	8.85	11.09	11.66	15.25	10.24	12.01
<b>Image acquisition</b>	Average	5'38"	3'27"	2'05"	2'31"	2'41"	44"
	sd	4'35"	1'30"	31"	1'24"	1'11"	32"
	pc	43.33	33.77	17.56	24.75	29.43	13.21

<b>Patient departure</b>	Average	2'02"	2'03"	3'12"	1'59"	1'45"	1'38"
	sd	58"	1'05"	1'36"	1'24"	1'14"	25"
	pc	15.64	20.07	26.97	19.51	19.20	29.43
<b>TOTAL</b>	Average	13'00"	10'13"	11'52"	10'10"	9'07"	5'33"
	sd	5'34"	2'52"	2'56"	5'11"	4'08"	4'45"
<b>Productivity</b>		304	387	333	389	434	713

### *CT world market*

The survey identified seven CT manufacturers. An eighth manufacturer produces a stationary model that was not included as it currently has a very small market share. Four manufacturers dominate the Brazilian market for CTs, but the other three also operate in Brazil, with a smaller presence.

Table 2 summarizes the offerings of CT entry-level models according to geographical region and manufacturer. Except for D and F (in Africa), all manufacturers offer dual or 4-slice entry-level models for Asia, South America, and Africa, and only C still offers single-slice entry-level models (in Asia). In the USA, models below 16-slice are offered by E and B [14-20].

**Table 2:** CT entry-level model (by the number of slices) offerings, by manufacturer and geographical region. "Europe" means that the site redirects to Europe. Internet search concluded December 2016.

<b>Region</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<b>USA / Canada / Mexico</b>	16	6 / 6 / 2	40 / 16 / 2	16	2	16	
<b>Central America</b>			2			16	
<b>Brazil / South America</b>	4	2	2	16		16 / 2	2
<b>Africa</b>	4	2	Europe			16	
<b>Oceania</b>	16	2	16			16	16
<b>Asia</b>	4	2	1	16	2	2	
<b>Europe</b>	16	2	2	16		16	
<b>Global (single site)</b>					2		

## **Discussion**

The aim of this study was to compare the productivity of CT models and to characterize CT entry-level offerings around the world. Medical equipment productivity is important for both private and public health services, in which waiting lists sometimes extend for months. However, the idea that doubling the number of CT slices per unit of time could double the number of exams (a linear increase) is not realistic, given that exam times are not exclusively dependent on the time needed for image acquisition/reconstruction [21].

This study indicates that the relationship between slices/rotation and productivity is not linear, and that one cannot proportionally increase CT productivity by using models with “more slices.” For instance, exchanging a single-slice for a 16-slice model increased productivity by only a factor of 1.47. This observation draws attention to the importance of characterizing CT offerings around the world, given that, under these circumstances, many simpler models would still be adequate for regions or countries with less stringent demands, and given that this offer is not well characterized, yet.

#### *CT exam times*

The duration of exam stages is similar, except for image acquisition times. Stages one, two, and six refer to the arrival and departure of a patient, while stages three, four, and five depend more directly on the device technology (ease of patient positioning, data input procedures, and speed of image acquisition). As expected, the 128-slice model was the fastest in terms of image acquisition and reconstruction. This equipment is designed for procedures that demand a large degree of detail, but would be over-dimensioned for simpler exams.

However, times for remaining stages were similar in other models, and therefore, the differences between the average exam times were not large. For example, the average total time for exams in the 128-slice model was 42% less than that of the simplest analyzed model. These results quantify the fact that, without changes in exam protocols, even a very fast device would ultimately yield a small productivity gain relative to older models. For instance, for the 128-slice model, gains could be achieved by protocol changes in patient positioning and departure (the longest stages).

#### *The world market for entry-level CTs*

In many countries, 1 to 4-slice CT models are still in widespread use. For instance, in Brazil, a 2014 study of 56 CTs in the State of Rio de Janeiro identified that 21% of these were dual-slice, and another 21% were single-slice. [6] In this case, most entry-level models were between 2 and 16-slice, and single-slice models were available exclusively in Asia [14-20].

In 2013, in Brazil, a single-slice CT scanner costs approximately US\$ 150,000; a dual-slice scanner, US\$ 190,000; a 4-slice scanner, US\$ 230,000; and a 16-slice scanner, US\$ 320,000. However, as mentioned, for most examinations, even single-slice models may be adequate [13], and the productivity necessary for small towns can also be achieved

with simpler models. Besides the cost problem, more sophisticated CTs usually have more complex and expensive maintenance, which becomes a more grave issue when one considers units located far from major urban centers. For example, a 2011 study identified that 85% of the 52 African hospitals studied had problems finding qualified local professionals to repair these devices [22]. Most African countries lack manufacturer offices, and therefore, their demands have to be met by offices in Europe or by local untrained personnel [23-25]. In Tunisia, a country with more than 10 million inhabitants, in 2011 there were 118 CTs and 21 MRIs, 70% of which are in private units [22].

*A low-cost solution: shareable CT platforms*

From an engineering point of view, differences between slice numbers in CTs can be summarized as: a) Detectors: “Multi-slice” models feature rows of detectors that determine the number of simultaneous slices (in the “single-slice” model there is only one row); b) Acquisition: More slices require greater capacity for data integration and more electronic boards; c) Collimation (defines the slice thickness): “Fan beams” in single-slice CTs are replaced by “cone beams” in multi-slice models; d) Communication: with increased data flow, transmission speed must increase with the number of slices; e) Design: The chassis (gantry and console) in the multi-slice models are larger than in the single-slice models, as they house more parts; f) Storage and image reconstruction: Increasing the number of slices increases data processing needs, thus requiring more computing power [13].

A suggestion to enable the production of cheaper CTs would be to use “shareable platforms.” This practice is common in the automotive industry, with platforms used by many car models allowing interchange of components and generating an economy of scale. These platforms would share CT parts such as body, motors, cabling, couch, console, high voltage generator, x-ray tube, couch/gantry control boards, and gantry rotational/stationary communication systems. These kind of CT could be included in programs such the WHO’s WHIS-RAD that developed simple x-ray systems focused in developing country’s needs [26].

In this way, a platform capable of holding up to a 32-slice system, for example, could receive a detector with only one row of detectors, collimators, boards, software, and hard disks (performing as a single-slice system). However, when necessary, the owner could request the addition/replacement of the necessary parts for an upgrade to a 4 to 32-slice system. These changes would not require the replacement of large parts such

as the gantry or the couch, nor a new physical installation, and this approach would greatly reduce transportation and labor costs and equipment downtime. Thus, cheaper equipment would be made available for markets that lack more resources. Currently, there are already upgradable equipment (such as 16 to 32-slice), but there are no options for scaling up from simpler models. From a marketing point of view, providing such scalability would have the advantage of generating brand loyalty.

## **Conclusion**

Differences among average exam times were not large, mainly due to exam stages not being directly related to data acquisition and image reconstruction. The increase in productivity due to the number of CT slices is not linear, and without organizational changes, a large productivity increase cannot be expected from changes to “faster” models. Therefore, CT equipment acquisition should consider variables such as the number and types of exams to be performed, keeping in mind that, in this context, “more” is not necessarily “better.” Especially for developing countries, opting for faster models may result in maintenance problems or in underutilization, justifying a more widespread offering of simpler models. The use of “modular” or “upgradeable” devices could create a new market, keeping entry-level devices economically competitive and increasing CT scan accessibility worldwide. This kind of strategy could be suggested and encouraged by IAEA, PAHO and WHO as well as other international bodies such as the International Society of Radiology (ISR) and the International Organization of Medical Physics (IOMP).

## **Acknowledgements**

This research was supported by the Brazilian agencies CAPES and CNPq, to whom we thank.

## **Conflict of Interest**

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

## **Financial Support**

This work was supported by the Brazilian agencies CAPES (grant number PROEX 3485/14) and CNPq (grants numbers PQ-308.627/2013-0 and PQ-309.744/2013-0).

## References

- [1] Balarajan Y, Selvaraj S & Subramanian SV. Health care and equity in India. *The Lancet*. 2011; 377(9764): 505-515.
- [2] World Health Organization (WHO). *Development of medical Devices Policies*. 2013; Geneva, Switzerland.
- [3] Shannoun, F, Perez, M, Pendse, N, Berumen, AV, Fahlgren, B, Groth, S, et al. WHO's Role in the Assessment of Medical Radiation Exposures and Devices. In: *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. 2009 Sep; Munich, Germany (pp. 498-501). Springer Berlin Heidelberg.
- [4] Duarte, AF, Soler, RDC, & Zavarezzi, F. Nasal endoscopy associated with paranasal sinus computerized tomography scan in the diagnosis of chronic nasal obstruction. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*. 2005; 71(3), 361-363.
- [5] Seeram, E. *Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control*. 4th ed. St Louis, MO: Elsevier Health Sciences. 2015.
- [6] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária-2009*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2009. Portuguese.
- [7] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2011. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://www.oecd-ilibrary.org/>.
- [8] World Health Organization (WHO). 2011. Density of computed tomography units. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://tinyurl.com/j33eh9a>.
- [9] Ginde, AA, Foianini, A, Renner, DM, Valley, M, Camargo Jr, CA. Availability and quality of computed tomography and magnetic resonance imaging equipment in US emergency departments. *Academic emergency medicine*. 2008; 15(8), 780-783.
- [10] Niska, R, Bhuiya, F, Xu, J. National hospital ambulatory medical care survey: 2007 emergency department summary. *Natl Health Stat Report*. 2010; 26(26), 1-31.
- [11] Schappert SM. National Hospital Ambulatory Medical Care Survey: 1992 Emergency Department Summary. *Vital Health Stat*. 1997;13:125:1–108.
- [12] ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. [Cited 2016 Jul 13]. Available from <http://tinyurl.com/jjkazto>. Portuguese.



- [13] Jiang H. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE. 2009.
- [14] General Electric Healthcare. [Cited 2016 Dec 14]. Available from [http://www3.gehealthcare.com/en/global\\_gateway](http://www3.gehealthcare.com/en/global_gateway).
- [15] Hitachi Medical Systems. [Cited 2016 Dec 13]. Available from <http://www.hitachimedical.com>.
- [16] Neusoft Medical Systems. [Cited 2016 Dec 16]. Available from <http://www.neusoft.com>.
- [17] Philips Healthcare. [Cited 2016 Dec 15]. Available from <http://www.usa.philips.com/healthcare/country-selector>.
- [18] Shimadzu Medical Systems. [Cited 2016 Dec 14]. Available from <http://www.shimadzu.com/med/index.html>.
- [19] Siemens Healthcare. [Cited 2016 Dec 13]. Available from <http://www.healthcare.siemens.com/>.
- [20] Toshiba Medical Systems. [Cited 2016 Dec 16]. Available from <http://www.toshibamedicalsystems.com/>.
- [21] Jhaveri, KS, Saini, S, Levine, LA, Piazzo, DJ, Doncaster, RJ, Halpern, EF et al. Effect of multislice CT technology on scanner productivity. *American Journal of Roentgenology*. 2001; 177(4), 769-772.
- [22] Guerhazi, A, Vanel, D, Rajhi, H, Mnif, N, Roemer, FW. The international skeletal society outreach programme in Tunisia 2011. *Skeletal radiology*. 2012; 41(11), 1343-1345.
- [23] Kachieng'a, MO. Technology management in the public health sector: Professional view from equipment maintenance experts. *East Africa Medical Journal*. 2002; 81(6).
- [24] Maranga, S, Kihui, J, Mutia, D. Maintenance management of medical equipment in hospitals. *Industrial Engineering Letters*. 2012; 2(3): 9-19.
- [25] Health Technology Management Policy (Medical Devices) – Republic of Sudan – Federal Ministry of Health. 2011. [Cited 2016 Aug 14]. Available from [http://fmoh.gov.sd/Health-policy/Sudan%20HTA&M%20Policy\\_final.pdf](http://fmoh.gov.sd/Health-policy/Sudan%20HTA&M%20Policy_final.pdf).
- [26] World Health Organization (WHO). 1995. Technical specifications for the World Health Imaging System for Radiography: the WHIS-RAD. [Cited 2017 Jul 27]. <http://apps.who.int/iris/handle/10665/60643>.

## C.4. Trabalho apresentado no IUPESM 2018

### Computer simulation in the analysis of computed tomography exam times

Rogério Santos<sup>1,2,a</sup>, Andrei Pires<sup>2,b</sup>, Wagner Pereira<sup>2,c</sup>, Renan Almeida<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup>CEFET "CSF" - RJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

<sup>2</sup>Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

<sup>a</sup>rogeriopires1@uol.com.br

<sup>b</sup>andreilenine@uol.com.br

<sup>c</sup>wcap58@gmail.com

<sup>d</sup>renan.m.v.r.almeida@gmail.com

**Abstract.** Computed Tomography (CT) is one of the most important tools in diagnostic imaging. In Brazil, among medical imaging devices, 4.7% were CTs, representing eighth place in exam numbers and first in costs. The aim of this study was to evaluate the effect of faster CT equipment on total exam time (from patient arrival to departure). To this end, exams were divided into six steps: patient arrival, patient movement in the examination room, patient positioning, data entry, image acquisition and patient exit. Step duration was measured on 84 exams with 1, 4 and 128-slices CTs in 5 private clinics/hospitals, in 2014/2015. Models were created in the MedModel<sup>®</sup> software and thirty days were simulated for a hospital operating 24h/day. Scenarios were simulated for three types of CTs using the average times obtained from the exams. In the model, except for the acquisition stage, the times from each step were the same for all CT types. Simulations showed that, for example, a single slice CT running inpatient examinations at night (8:00 PM - 7:00 AM) and adding another dressing room could decrease total exam time by approximately 33%; while replacement of a single slice CT by a 4 slices model (more expensive) would result in a much smaller overall time reduction. In conclusion, productivity gains may be smaller than expected when replacing simpler models by more sophisticated ones, and patient care time is not only a function of the speed of data acquisition, and organizational changes can produce decreases in these times.

**Keywords:** Discrete Event Simulation, Scheduling, Computed Tomography.

#### 1 Introduction

Computed Tomography (CT) is one of the most important diagnostic tools in medicine, with wide scope for clinical use [1]. CTs' diagnostic capability increased while examination times and radiation doses diminished. In 2009, Brazil had 15.6 CT scanners per million people, a density comparable to Canada (14.2) and New Zealand (15.8). However, Brazil's southeastern region had 21.8 CTs per million people, more than Luxembourg (19.7); and its northeastern region had 8.1 CTs per million people, fewer than Tunisia (9.3). Of all medical imaging devices in Brazil in 2009, 4.7% were CTs, ranking eighth in the number of installed devices [2-4]. In the US, the percentage of patients using CTs in emergency departments increased from 2.4% in 1992 to 13.9% in 2007 and, only 0.7% of patients in these departments used magnetic resonance imaging [5, 6], underscoring the importance of CT availability.

However, even in the cities where CTs are more available, large queues in public services are common, sometimes extending into months of waiting. Hence, increasing productivity also means increasing the availability and number of patients in the public services; as well as profitability in the private ones. Thus, one can see the importance of studying these processes, since performance gains may not produce productivity increases if stages of the process do not change [7].

Computer simulation is as an important tool to study the behavior of computed tomography sectors. It has been applied successfully in decision making in many areas, and, in the health sector [8, 9], allowed for the optimization of physical, financial and human resources in many hospital settings [10, 11]. Therefore, the objective of the present study was to simulate simple and inexpensive scenarios that could decrease the CTs patients' care time or increase the productivity in a general hospital.

## 2 Materials and methods

### 2.1. Studied devices

To provide a broad overview of the equipment, and considering that even single-slice models are still used in many countries [5], models with 1, 4 and 128 slices were studied. Therefore, a convenience sample of five devices, from brands A (1, 4-slice) and B (128-slice), in five private health facilities located in four cities of the state of Rio de Janeiro, Brazil (one specialized radiology clinic, one general medicine clinic and three general hospitals). Three single-slice CTs were studied, one manufactured in 2003 and two devices in 2009. The 4-slice model was manufactured in 2005 and the 128-slice model in 2014. All studied technologies are used in Brazil and remain in production in several countries [6, 7]; and all studied equipment are still in use.

### 2.2. Measurements

Exam procedures were divided into: 1. Patient entrance to the examination room; 2. Patient changing clothes; 3. Patient positioning; 4. Patient's data input into the CT's computer; 5. Image acquisition; and 6. Patient departure.

Two researchers measured the times using a stopwatch application with a precision of one hundredth of a second. Values were rounded, resulting in measured times in minutes and seconds. So it was converted to the decimal mode to use in MedModel<sup>®</sup> software. Exam procedures have not changed since their collection.

### 2.3. The simulation

Models were created in the MedModel<sup>®</sup> software using as parameters:

- **Locations:** In/Out, Waiting room (capacity: 10 patients), Dressing room (one or two), CT Scanner e Console;
- **Entities:** Patients (scheduled, emergency and scheduled with radio-contrast);
- **Arrival cycles:** thirty scheduled patients without radio-contrast, seventeen emergency patients (24 hours non-scheduled) and five scheduled patients using radio-contrast per day;
- **Resources:** Operator and Nurse; and
- **Process times:** 1. Patient entrance to the examination room ( $6.47e-002+L(0.62, 0.82)$ ), using one resource; 2. Patient clothes change ( $0.13+E(1.04)$ ); 3. Patient positioning at the CT scanner ( $1.13e-002+L(1.13, 0.62)$ ) using one resource; 4. Patient's data input into the CT computer ( $-1.21+L(2.27, 0.48)$ ) using one resource; 5. Image acquisition: single-slice ( $1.4+E(1.95)$ ), 4-slice ( $0.13+L(1.75, 0.55)$ ) and 128-slice ( $0.37+E(0.60)$ ) using one resource; and 6. Patient departure ( $-0.11+L(2.08, 1.4)$ ).

Above, “L” and “E” are the Lognormal and Exponential probability distributions, and times are reported as “minimum + L((Mean - minimum), SD)” and “minimum + E(SD)”; all times in decimal minutes.

For exams using radio-contrast, two more data acquisition (with the same duration of the first) and venous access placement/remove are needed; these processes use one resource each. Priority of care was defined as higher for emergency patients.

Five scenarios were created and studied for the three CT technologies:

- **Scenario 1:** The default: one operator, one dressing room and scheduling patients from 7:00AM to 8:00PM;
- **Scenario 2:** Adding 24 hours scheduling to the default model;
- **Scenario 3:** The default model with 2 dressing rooms;
- **Scenario 4:** Adding 24 hours scheduling to the third model;
- **Scenario 5:** Adding a nurse to the fourth model.

The simulation focused on patients' mean time in the system, from arrival to departure. One month of a CT sector operation located inside a fictitious hospital was simulated; operating 24 hours/day. Average exam times were based on the weighted average of the number of monthly exams for each patient type (840 exams without venous contrast, 140 with contrast and 476 non-scheduled emergency exams).

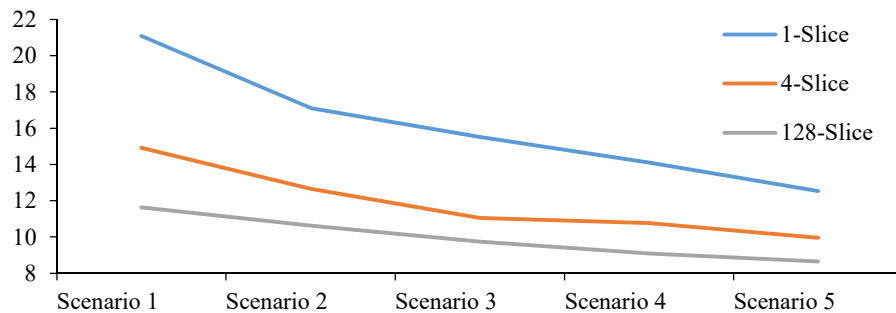
## 3 Results

Table 1 shows the patients' mean time in the system for the three CT technologies studied in five simulated scenarios. Figure 1 shows the weighted average times for each CT model in the five proposed scenarios.

**Table 1.** Patients mean time in the system for the three CT types in five simulated scenarios. Weighted average times for each CT model in five scenarios. Scenario 1: Default: 1 operator, 1 dressing room and scheduling from 7:00AM to 8:00PM. Scenario 2: Adding 24 hours scheduling to the default. Scenario 3: Default with 2 dressing rooms. Scenario 4: 24 hours scheduling and 2 dressing rooms. Scenario 5: Adding a nurse to the fourth model. Time in decimal minutes.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
<b>1-Slice</b>					
No Contrast	21.16	16.35	14.99	13.11	11.73
Emergency	17.56	15.40	13.39	12.64	11.46
Contrast	32.44	27.44	25.99	25.14	21.02
<b>4-Slice</b>					
No Contrast	14.82	12.18	10.51	10.12	9.16
Emergency	12.48	11.44	9.74	9.57	9.50
Contrast	23.72	19.68	18.77	18.64	16.20
<b>128-Slice</b>					
No Contrast	11.30	10.01	9.30	8.53	8.14
Emergency	10.14	9.79	8.66	8.19	8.07
Contrast	18.64	17.18	16.17	15.49	13.72
<b>Weighted</b>					
<b>1-Slice</b>	21.07	17.10	15.52	14.11	12.53
<b>4-Slice</b>	14.91	12.66	11.05	10.76	9.95
<b>128-Slice</b>	11.63	10.63	9.75	9.09	8.65

Introducing exams between 8:00 PM and 7:00 AM produces a decrease in the system mean time of 18.84%, 15.09% and 8.60%, for single, 4 and 128 slice CTs, respectively. The addition of another dressing room reduced these times in 26.34%, 25.89% and 16.17%, while the combination of the two strategies generated a decrease of 33.03%, 27.83% and 21.84%, respectively. Finally, the models with two dressing rooms, night scheduling and one nurse implied in a decrease of 40.53%, 33.27% and 25.62% for the three TC technologies studied.



**Figure 1.** Weighted average times (in decimal minutes) for each CT model in five scenarios.

## 4 Discussion

The aim of this study was to simulate and compare scenarios that could reduce the average system time for patients using hospital CT services. Since our focus was specifically on equipment productivity, cost and

image quality were not included here. However, it is known that 1mm slice resolution (used in studied models) can still yield a degree of detail sufficient for many clinical applications [7].

As mentioned, medical equipment productivity is important for both private and public health services, in which waiting lists sometimes may extend for months. Faster exams can represent more exams/time, but the idea that doubling the number of CT slices per unit of time could reduce to half the system time (a linear decrease) is not realistic, since exam times are not exclusively dependent to the image acquisition/reconstruction time [7, 12].

In fact, this study indicates that the CT exam duration do not proportionally decrease by using models with “more slices”. For instance, exchanging a single-slice for a 128-slice model implies in a decrease in system time of 45%. These results draw attention to the importance of process optimization as whole, if larger productivity gains are desired. Similarly, it could be seen that adding another dressing room and introducing night scheduling for the single-slice device allowed an average time in the system smaller than that of a 4-slice. Thus, changing patient scheduling strategy can greatly reduce patient waiting times and increase productivity, and, considering that no new resources are needed (both operator and equipment are already available) night scheduling is an especially interesting option. Finally, hiring a nurse would reduce the time of patient care even more, but, in this case, the costs thus incurred would have to be taken into account for the analysis.

It must be noted that a CT sector with a single-slice CT with 24 hours of scheduling, two dressing rooms and one nurse would have an average service time (12.53 min) lower than a default sector with a 4-slice (14.91 min) or slightly larger than a default sector with a 128-slice (11.63 min). This result should be contrasted with the investment for the replacement of a single-slice CT by another 128-slice CT, which can easily surpass US\$ 500,000.00.

## 5 Conclusion

This study shows that productivity gains may be smaller than expected when replacing simpler CT models with more “sophisticated” ones, and patient care time is not only a function of the speed of data acquisition, since organizational changes can produce considerable decreases in these times. Thus, increases in productivity due to the number of CT slices are not linear, and without organizational changes, a large productivity increase cannot be expected from changes to “faster” models. CT equipment acquisition should consider variables such as the number and types of exams; keeping in mind that, in this context, “more” is not necessarily “better” [7].

### Conflict of interest statement:

The authors declare that they have no conflict of interest.

## 6 References

1. Sceram, E. *Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control*. 4th ed. St Louis, MO: Elsevier Health Sciences. 2015.
2. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária-2009*. Rio de Janeiro: IBGE. 2009. Portuguese.
3. World Health Organization (WHO). 2011. Density of computed tomography units. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://tinyurl.com/j33eh9a>.
4. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2011. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://www.oecd-ilibrary.org/>.
5. Ginde, AA, Foianini, A, Renner, DM, Valley, M, Camargo Jr, CA. Availability and quality of computed tomography and magnetic resonance imaging equipment in US emergency departments. *Academic emergency medicine*. 2008; 15(8), 780-783.
6. Niska, R, Bhuiya, F, Xu, J. National hospital ambulatory medical care survey: 2007 emergency department summary. *Natl Health Stat Report*. 2010; 26(26), 1-31.
7. Santos, R.P., Pires, A.L.A., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R.. (2017) "Computed Tomography Scanner Productivity and Entry-Level Models in the Global Market." *Journal of healthcare engineering*. vol. 2017, Article ID 1304960, 5 pages. doi:10.1155/2017/1304960.
8. Jacobson, S.H., Hall, S.N., Swisher, J.R. (2006), “Discrete-Event Simulation of Health Care Systems”. In: *Int Series in Operations Research & Management Science*. v.91 p. 211-52.
9. Ferreira, R.B., Coelli, F.C., Almeida, R.M.V.R, Pereira, W.C.A. (2008) “Optimizing patient flow in a large hospital surgical centre”, In: *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, v. 14, p.1031-1037.

10. Villamizar, J.R., Coelli, F.C., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R. (2011) "Discrete-event computer simulation methods in the optimization of a physiotherapy clinic". *Physiotherapy* v. 97, 71–77.
11. Coelli, F.C., Almeida, R.M.V.R., Pereira, W.C.A. (2010) "A cost simulation for mammography examinations taking into account equipment failures and resource utilization characteristics", In: *Journal of Evaluation in Clinical Practice* v.16, p. 1198–1202.
12. Jhaveri, K.S., Saini, S., Levine, L.A., Piazzo, D.J., Doncaster, R.J., Halpern, E.F. et al. Effect of multislice CT technology on scanner productivity. *American Journal of Roentgenology*. 2001; 177(4), 769-772.

## C.5. Trabalho apresentado no CBEB 2018

### Computer simulation as a tool in the definition of Computed Tomography acquisition characteristics

Rogério Santos<sup>1,2,a</sup>, Andrei Pires<sup>2,b</sup>, Wagner Pereira<sup>2,c</sup>, Renan Almeida<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> CEFET "CSF" - RJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

<sup>2</sup> Programa de Engenharia Biomédica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil

<sup>a</sup> rogeriopires1@uol.com.br

<sup>b</sup> andreilenine@uol.com.br

<sup>c</sup> wcap58@gmail.com

<sup>d</sup> renan.m.v.r.almeida@gmail.com

**Abstract.** A careful planning of equipment acquisition is important for both private and public health services. Computed Tomography (CT) is one of the most important tools in diagnostic imaging. In Brazil, among medical imaging devices, 4.7% were CTs, representing eighth place in exam numbers and first in costs. The aim of this study was to simulate the installation of a new CT service with 1, 4, 16 or 128-slice devices, determining its profitability after 3 years in a general hospital. To this end, exams were divided into six steps. Models were created in the MedModel® software and three years were simulated for a hospital operating 24h/day. Two scenarios were simulated for four CT types with two values of exam increase rates (scenario 1 starting with 50 exams/month, with a small growth rate in the number of exams; and scenario 2 also starting with 50 exams/month, but with a greater growth rate). The costs for acquisition (new and used equipment), installation and operation were estimated, together with overall exam reimbursement values. None of the simulated CT models achieved profit after 36 months in scenario 1. In scenario 2, all simulated equipment were profitable after 36 months, except for the new 128-slice. In conclusion, the results indicate the need for a study of the expected number exams. The study shows the importance of knowing the real potential of a new medical service and the value of computer simulation tools in the design of a medical-hospital service.

**Keywords:** Discrete Event Simulation, Specifying, Computed Tomography.

## 1 Introduction

The careful planning of equipment acquisition is fundamental for both private and public health services. In fact, one of the Clinical Engineers most important tasks is the management of the technological resources available for hospital medical units, 2 from acquisition to retirement, and including operator training, maintenance and management. For instance, during acquisition, a Clinical Engineer should give input on installation feasibility and model specification according to the needs of the health unit, thus avoiding super or under sizing. [1]

Computed Tomography (CT) is one of the most important diagnostic tools in medicine, with a wide scope of clinical use [2]. Of all medical imaging devices in Brazil in 2009, 4.7% were CTs, ranking eighth in the number of installed devices [3-5]. In the US, the percentage of patients using CTs in emergency departments increased from 2.4% in 1992 to 13.9% in 2007 and only 0.7% of these patients used magnetic resonance imaging [6, 7], underscoring the importance of CT availability.

Computer simulation is as an important tool for the study the characteristics of computed tomography sectors. It has been successfully applied in decision making in many areas. For instance, in the health sector it allowed for the optimization of physical, financial and human resources in many hospital settings [8-12].

Therefore, the objective of the present study was to simulate the installation of a new CT service with 1, 4, 16 or 128-slice devices, determining its profitability after a pre-defined period. Two scenarios in a general hospital were considered.

## 2 Materials and methods

### 2.1. Studied devices

To provide a broad overview of equipment use, and considering that even single-slice models are still used in many countries [2], models with 1, 4, 16 and 128 slices were studied here, in six private health facilities located in Rio de Janeiro, Brazil. Three single-slice CTs, one 4-slice, one 16-slice and 128-slice were studied (a convenience sample of six devices). All studied technologies are used in Brazil and remain in production in several countries [13]; and all studied equipment are still in use. The market values for the four technologies were used for both new and used models.

## 2.2. Exam stages and times

The categorization of the exam procedures, the methodology of measurement of the time and the times of each step were the same as described in a previous work [12]. In summary, the steps consist of 1. Patient entrance to the examination room; 2. Patient changing clothes; 3. Patient positioning; 4. Patient's data input prior to exam; 5. Image acquisition; and 6. Patient departure. Two researchers measured the times in minutes and seconds, which were then converted to the decimal mode to use in MedModel® software. Exam procedures have not changed since their collection.

## 2.3. The simulation

The Models were created in the MedModel® software using as parameters:

- **Locations:** Entrance/Exit point, Waiting room, Dressing room, CT Scanner and Console (CT's command);
- **Entities:** Patients (scheduled consults, emergency and scheduled with radiocontrast);
- **Arrival cycles:** 60% of patients were defined as scheduled without radiocontrast, 30% were emergency patients (non-scheduled) and 10% were scheduled patients using radiocontrast. Two scenarios were simulated (described below);
- **Resource:** Only models with one operator were considered; and
- **Process times:** 1. Patient entrance to the examination room; 2. Patient clothes change; 3. Patient positioning at the CT scanner; 4. Patient data input into the CT computer; 5. Image acquisition; and 6. Patient departure. Steps 1, 3, 4 and 5 use one resource.

For exams using radiocontrast, two more data acquisition stages (with the same duration of "Image acquisition") and venous access placement/removing times are needed; these processes also use one resource each. Priority of care was defined as higher for emergency patients.

The simulation focused in the profitability of the CT sector. Three years of a CT sector operation located inside a fictitious hospital operating 24 hours/day were simulated with the following scenarios:

- **Scenario 1:** operation starts with 50 exams/month with a monthly growth rate in exams of 10% (first year), 5% (second) and 2% (third year);
- **Scenario 2:** also starts with 50 exams/month but with a monthly growth rate of 15%; 7% and 3%.

Only the second scenario was simulated for the 128-slice model.

It was considered that no increase of electrical power would be necessary for the installation of the CT and that its area only would needs small adjustments such as radiological protection, refrigeration and electrical installation.

Costs of installation and operation were inferred using as an example a similar operating unit in the city of Rio de Janeiro. All values were calculated in Brazilian Reais and converted to US Dollars at the rate of 1 Dollar = R\$ 3.30, and then rounded.

## 3 Results

### 3.1. The stages duration

The average times calculated from the measurements were as follows:

1. Patient entrance to the examination room:  $6.47e-002+L(0.62, 0.82)$ ;
2. Patient clothes change:  $0.13+E(1.04)$ ;
3. Patient positioning at the CT scanner:  $1.13e-002+L(1.13, 0.62)$ ;
4. Patient data input into the CT computer:  $-1.21+L(2.27, 0.48)$ ;
5. Image acquisition: single-slice,  $1.4+E(1.95)$ ; 4-slice,  $0.13+L(1.75, 0.55)$ ; 16- slice,  $0.202+L(2.6, 1.24)$ ; 128-slice,  $0.37+E(0.60)$ ;



6. Patient departure:  $-0.11+L(2.08, 1.4)$ .

Above, “L” and “E” are the Lognormal and Exponential probability distributions, and times are reported as “minimum + L((Mean - minimum), SD)” and “minimum + E(SD)”; all times in decimal minutes.

### 3.2. Costs, Reimbursements and Profit

Taking into account the assumptions above, an installation cost of US\$ 11,515.00 was considered, and CT acquisition costs were: 1-Slice: US\$ 90,909.00 for a new and US\$ 54,545.00 for a used one; 4-Slice: US\$ 175,758.00 new and US\$ 106,060.00 used; 16-Slice: US\$ 242,424.00 new and US\$ 151,515.00 used; 128-Slice: US\$ 484,848.00 new and US\$ 333,333.00 used.

The suggested monthly fixed cost (covering 7 operator wages and standby electrical power) during the CT contract warranty was US\$ 9,090.00; and, after the warranty period (1 year for new models and 3 months for used equipment), US\$ 909.00/month was added for a basic maintenance contract. The suggested cost for each exam was US\$ 21.00, including wear of the x-ray tube, power consumption and miscellaneous expenses. Exams with radiocontrast had an extra US\$ 26.00 cost. The reimbursement for each exam was defined as US\$ 72.00 without radiocontrast and US\$ 109.00 with radiocontrast after (20%) taxes. Table 1 shows profits after the defined 36 months period of operation and the necessary time to pay the initial investments for the four CT technologies studied in the two simulated scenarios.

**Table 1.** Profit after 36 months (in dollar) and time needed (in months) to pay for initial investment; four CT technologies and two simulated scenarios.

Equipment	Return of investment	New Device Scenario 1	New Device Scenario 2	Used Device Scenario 1	Used Device Scenario 2
1-Slice	Time to profit	-	24	-	22
	Profit 36 months	-91,312	268,998	-62,230	299,119
4-Slice	Time to profit	-	29	-	25
	Profit 36 months	-176,169	185,180	-113,745	247,604
16-Slice	Time to profit	-	32	-	28
	Profit 36 months	-242,836	118,513	-159,200	202,150
128-Slice	Time to profit	-	-	-	35
	Profit 36 months	-	-131,162	-	11,262

None of the simulated CT models achieved profit after 36 months in scenario 1. In scenario 2, all simulated equipment became profitable after 36 months, except for the new 128-slice. Only the single-slice models were profitable after 24 months.

The number of patients attended were: without radiocontrast 4011 in Scenario 1 and 8136 in Scenario 2; with radiocontrast 668 in Scenario 1 and 1357 in Scenario 2; emergency (non-scheduled) 1999 in Scenario 1 and 4058 in Scenario 2.

## 4 Discussion

The aim of this study was to simulate and compare scenarios to determine how long the investment in a new CT sector facility would become profitable; and what profit would be achieved after 3 years using the types of studied CTs. Since the focus was specifically on CT sector facility cost, image quality was not evaluated here.

The results indicate the need for a realist analysis of the expected number exams prior to equipment acquisition. A careful specification of equipment characteristics for acquisition is important for both private and public health services. In the latter, waiting lists sometimes may extend for months in Brazil [14]. Although faster exams may represent more exams/time, costs may become prohibitive and the productivity gains unnecessary [7]. In addition, CT manufacturers increasingly introduce new models and try to convince buyers of their need, but both acquisition and maintenance costs are also greater in these new models, and the correct equipment specification becomes even more important to avoid the effects of marketing advertising.

Exam reimbursements in this study are in an intermediate range between those paid by the Brazilian public health system (SUS) and those paid for more expensive private health insurances. This shows how much expensive CT services can make be, even making their implementation unfeasible.

As mentioned, despite their slower speed, even simpler models still allow for most types of exams (except heart exams that demand 128-slice and angiographic exams that demand 16-slices for ideal quality) [2]. Therefore, choosing simpler and/or used equipment may adequately suit a health unit needs, especially for those with a small number of simple exams. In this case, the option for simpler and cheaper models could means, for example, a greater dissemination of the technology, decreasing waiting queues without investment increase [12, 13, 15].

On the other hand, health units that attend to specific needs, as angiographic and cardiologic exams, should opt for fastest models. The same applies to units that have a high demand for exams and work with more expensive exam reimbursements. For large demands of simple exams and a mix of some complex exams, a solution comprising two equipment (a simple CT model and a faster one), can also be used.

## 5 Conclusion

This study shows the importance of knowing the real exam demand of a new medical service (here, represented by the CT sector). In addition, in this context, Clinical Engineering becomes an indispensable tool for the design of the sector and in the definition of its implementation feasibility.

The study also shows the importance of avoiding market “impositions”, since more sophisticated/faster CTs should be reserved for services with higher demand (scenario 2 in the present study, for example), guaranteeing return on investment.

On the other hand, the importance of the availability of new low-entry CT devices such as single-slice for low-demand units (Scenario 1) should be noted, and a used CT market is important for the same reason.

## 6 References

1. Enderle, J.D., & Bronzino, J.D. (2012). Introduction to biomedical engineering. Academic press.
2. Seeram, E. Computed tomography: physical principles, clinical applications, and quality control. 4th ed. St Louis, MO: Elsevier Health Sciences. 2015.
3. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estatísticas da Saúde - Assistência Médico-Sanitária-2009. Rio de Janeiro: IBGE. 2009. Portuguese.
4. World Health Organization (WHO). 2011. Density of computed tomography units. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://tinyurl.com/j33eh9a>.
5. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2011. [Cited 2016 Aug 14]. Available from <http://www.oecd-ilibrary.org/>.
6. Ginde, AA, Foianini, A, Renner, DM, Valley, M, Camargo Jr, CA. Availability and quality of computed tomography and magnetic resonance imaging equipment in US emergency departments. Academic emergency medicine. 2008; 15(8), 780-783.
7. Niska, R, Bhuiya, F, Xu, J. National hospital ambulatory medical care survey: 2007 emergency department summary. Natl Health Stat Report. 2010; 26(26), 1-31.
8. Jacobson, S.H., Hall, S.N., Swisher, J.R. (2006), “Discrete-Event Simulation of Health Care Systems”. In: Int Series in Operations Research & Management Science. v.91 p. 211-52.
9. Ferreira, R.B., Coelli, F.C., Almeida, R.M.V.R, Pereira, W.C.A. (2008) “Optimizing patient flow in a large hospital surgical centre”, In: Journal of Evaluation in Clinical Practice, v. 14, p.1031-1037.
10. Coelli, F.C., Almeida, R.M.V.R., Pereira, W.C.A. (2010) “A cost simulation for mammography examinations taking into account equipment failures and resource utilization characteristics”, In: Journal of Evaluation in Clinical Practice v.16, p. 1198–1202.
11. Villamizar, J.R., Coelli, F.C., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R. (2011) “Discreteevent computer simulation methods in the optimization of a physiotherapy clinic”. Physiotherapy v. 97, 71–77.
12. Santos, R.P., Pires, A.L.A., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R.. Computer simulation in the analysis of computed tomography exam times. In: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, June 3-8, 2018, Prague, Czech Republic. Springer, 2018. In press.
13. Santos, R.P., Pires, A.L.A., Pereira, W.C.A., Almeida, R.M.V.R.. (2017) "Computed Tomography Scanner Productivity and Entry-Level Models in the Global Market." Journal of healthcare engineering. vol. 2017, Article ID 1304960, 5 pages. doi:10.1155/2017/1304960.
14. Oliveira, J., Girard, A.C., Medeiros, A.A., & Nascimento, N.F.S.. Satisfação e Percepção dos Usuários de uma Unidade Básica de Saúde da Família Sobre o SUS. Cadernos de Educação, Saúde e Fisioterapia, 2014, 1.1.
15. Jhaveri, K.S., Saini, S., Levine, L.A., Piazza, D.J., Doncaster, R.J., Halpern, E.F. et al. Effect of multislice CT technology on scanner productivity. American Journal of Roentgenology. 2001; 177(4), 769-772.