

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM DE SISTEMAS  
COMPLEXOS

GABRIEL MAGALHÃES NUNES GUIMARÃES

**Simulação baseada em agentes para análise econômica de  
sistemas de apoio à decisão hospitalar em indicação de  
Unidades de Terapia Intensiva**

São Paulo  
2015

GABRIEL MAGALHÃES NUNES GUIMARÃES

**Simulação baseada em agentes para análise econômica de  
sistemas de apoio à decisão hospitalar em indicação de  
Unidades de Terapia Intensiva**

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos.

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 21 de outubro de 2014. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Flávia Mori Sarti

São Paulo  
2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

## CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

### Biblioteca

Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo

Guimarães, Gabriel Magalhães Nunes

Simulação baseada em agentes para análise econômica de sistemas de apoio à decisão hospitalar em indicação de Unidades de Terapia Intensiva / Gabriel Magalhães Nunes Guimarães ; orientadora, Flávia Mori Sarti. – São Paulo, 2015  
59 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, em 2014  
Versão corrigida

1. Administração hospitalar - Simulação. 2. Administração e planejamento em saúde - Simulação. 3. Recursos em saúde. 4. Sistema de saúde. 5. Economia da saúde. 6. Gastos em saúde. 7. Sistemas dinâmicos. 8. Modelo baseado em agentes. I. Sarti, Flávia Mori, orient.  
II. Título.

CDD 22.ed. – 362.11068

Dissertação sob o título "Simulação baseada em agentes para análise econômica de sistemas de apoio à decisão hospitalar em indicação de Unidades de Terapia Intensiva", defendida por Gabriel Magalhães Nunes Guimarães e aprovada em 21 de outubro de 2014, em São Paulo, Estado de São Paulo, pela banca examinadora constituída pelos seguintes doutores:

Prof<sup>a</sup>.Dr.<sup>a</sup> Flávia Mori Sarti  
Universidade de São Paulo

Prof<sup>a</sup>.Dr.<sup>a</sup> Maria Regina Fernandes de Oliveira  
Universidade de Brasília

Prof.Dr. Camilo Rodrigues Neto  
Universidade de São Paulo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço minha esposa por todo o apoio e paciência, meus colegas de pesquisa pelo incentivo e minha orientadora pela confiança.

"Todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis."

(George Edward Pelham Box)

## RESUMO

GUIMARÃES, G.M.N. **Simulação baseada em agentes para análise econômica de sistemas de apoio à decisão hospitalar em indicação de Unidades de Terapia Intensiva**. 2015. 59f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Sistemas gerenciais em estabelecimentos de saúde podem ser considerados sistemas complexos, tendo em vista interação entre diferentes tipos de agentes na tomada de decisão (médico, paciente, gestor, entre outros), observação de transições de fase em epidemiologia, emergência de padrões de comportamento auto-organizado entre profissionais de saúde e incertezas quanto ao desfecho em saúde pós-tratamento. Em geral, os sistemas de apoio à decisão médica buscam maximizar resultados positivos e minimizar riscos em saúde aos pacientes, assim como propor diretrizes terapêuticas padronizadas e controlar custos em saúde. Há evidências de diferenças nos custos e benefícios derivados de sistemas decisórios Bayesianos centralizados (única distribuição *a priori*) e descentralizados (uma distribuição *a priori* por médico) aplicados ao processo de decisão de reserva de leito de Unidades de Terapia Intensiva (UTI) para períodos pós-operatórios. A existência de interação entre médicos com diferentes papéis no sistema decisório de indicação de UTI requer técnicas sofisticadas de avaliação econômica para comparação de vantagens e desvantagens associadas sistemas decisórios Bayesianos centralizados e descentralizados; tendo em vista que a aplicação de técnicas simples, como árvores de decisão ou cadeias de Markov, podem apresentar resultados imprecisos. Os objetivos deste estudo foram analisar a relação custo-benefício de sistemas de apoio à decisão médica centralizados e descentralizados para indicação de reserva de leito de UTI pós-operatório da perspectiva do sistema de saúde. Foi utilizada modelagem baseada em agentes, a partir de simulação de agentes usando raciocínio e atualização de crenças Bayesianos implementada no software NetLogo com análise de sensibilidade em Behavior Space. O modelo de decisão descentralizada apresenta benefício três vezes superior ao modelo centralizado (R\$600 contra R\$200). O modelo decisório descentralizado apresenta melhor razão custo-benefício ao sistema de saúde, permitindo maior flexibilidade na decisão médica e adaptabilidade dos agentes a diferentes situações.

Palavras-chave: Sistemas complexos, Avaliação econômica, Modelagem baseada em agentes, Análise custo-benefício, Sistema de saúde.

## ABSTRACT

GUIMARÃES, G.M.N. **Economic analysis of hospitalar intensive care indications using decision support systems through agent based simulation.** 2015. 59f. Thesis (Master in Sciences) - School of Arts, Sciences and Humanities, University of Sao Paulo, Sao Paulo, 2014.

Management systems in health facilities may be considered complex systems, due to the interaction among different types of agents in the decision process (physician, patient, manager, among other), observation of phase transitions in epidemiology, emergence of patterns in self-organized behavior among health professionals, and uncertainty in relation to health outcomes after treatment. In general, the medical decision support systems seek to maximize positive results and minimize risks in health to patients, as well as to propose standard therapeutic guidelines and to control the treatment costs. There are evidences of differences in costs and benefits derived from centralized (unique distribution *a priori*) and decentralized (one distribution *a priori* for each physician) Bayesian decision systems applied to the process related to decision of post-operative booking of hospital beds in Intensive Care Unit (ICU). The existence of interaction among physicians in different roles in the decision system for ICU indication requires sophisticated techniques in economic evaluation for comparison of advantages and disadvantages associated to centralized and decentralized Bayesian decision systems; since other techniques, as decision trees and Markov chains, may present imprecise results. The objective of this study was to analyze the cost-benefit ratio of centralized and decentralized medical decision support systems for indication of booking of ICU beds in post-operative period using the perspective of the health system. One agent-based model was applied, using simulation of agents based on Bayesian reasoning and beliefs updating implemented in the software NetLogo with sensitivity analysis in Behavior Space. The decentralized decision model presents benefits three times higher than the centralized decision model (US\$270.27 versus US\$90.09). The decentralized decision model presents better cost-benefit ratio to the health system, allowing enhanced flexibility in the medical decision process and adaptability of the agents to different situations.

Keywords: Complex Systems, Economic Analysis, Agent based modeling, Cost-benefit analysis, Healthcare system.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das decisões sobre necessidade de reserva de leito de UTI para pós-operatório. . . . .	21
Figura 2 – Fluxo do modelo. . . . .	28
Figura 3 – Comparação entre dois modelos adaptativos de sistemas de decisão médica. . . . .	35
Figura 4 – Probabilidade de cancelamentos em função do número de avaliadores. . . . .	39
Figura 5 – Probabilidade de reservas desnecessárias em função do número de avaliadores. . . . .	40
Figura 6 – Probabilidade de reservas necessárias e não realizadas em função do número de avaliadores. . . . .	40
Figura 7 – Análise múltipla de sensibilidade do benefício esperado em R\$ dos modelos estudados em função do tempo. . . . .	41
Figura 8 – Análise múltipla de sensibilidade do custo esperado em R\$ dos modelos estudados em função do tempo. . . . .	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição padronizada dos principais elementos do modelo. ....	27
Tabela 2 – Classificação ASA. ....	28
Tabela 3 – Variáveis de custo e de benefício. ....	34
Tabela 4 – Custos e benefícios estimados de acordo com a fonte de custo. ....	35
Tabela 6 – Incidência de erros de avaliação. ....	39
Tabela 7 – Comparação do custo dos desfechos entre os modelos estáveis por ano. ..	40
Tabela 8 – Análise de sensibilidade do benefício líquido de cada modelo estável. ....	41
Tabela 9 – Análise de sensibilidade do benefício líquido de cada modelo nos 10 primeiros anos. ....	41
Tabela 10 – Análise de sensibilidade de incidência de erros de avaliação. ....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla	Definição
AE	Avaliação econômica
ASA	do inglês <i>American Society of Anesthesiologists</i> : classificação de risco
$B_c$	benefício monetário ao evitar cancelamento de cirurgia
$B_d$	benefício monetário ao evitar indicação desnecessária de UTI
$B_f$	benefício monetário ao evitar não indicação de UTI necessária
$C_c$	Custo do modelo centralizado
$C_d$	Custo do modelo descentralizado
$C_p$	Custo do modelo atual
ES	Economia da saúde
IC95%	Intervalo de confiança de 95%
MCCM	Monte Carlo de Cadeia de Markov
SCBDCs	sistemas clínicos de suporte à decisão baseados em computadores
UTI	Unidade de Terapia Intensiva

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	O Sistema Único de Saúde .....	13
1.1.1	<i>Saúde baseada em evidências</i> .....	14
1.1.2	<i>Economia da saúde</i> .....	15
1.2	Modelos de decisão clínica .....	17
1.2.1	<i>Sistemas de apoio à decisão médica</i> .....	18
1.2.2	<i>Teorema de Bayes</i> .....	19
1.2.3	<i>Inferência Bayesiana</i> .....	19
1.2.4	<i>O sistema acoplado de decisões sobre reserva de leito de UTI</i> ..	21
1.2.5	<i>Auxílio à decisão para reserva de leitos de UTI</i> .....	22
1.2.6	<i>Caracterização do modelo de decisão sobre reserva de leitos de UTI</i> .....	23
1.3	Modelagem de sistemas complexos .....	24
1.3.1	<i>Teoria dos sistemas complexos e avaliações de tecnologias de saúde</i> .....	25
2	MÉTODO .....	27
2.1	Desfechos .....	29
2.2	Modelagem .....	29
2.2.1	<i>Estado inicial do modelo implementado</i> .....	29
2.2.2	<i>Estabilidade do modelo implementado</i> .....	30
2.2.3	<i>Média dos blocos</i> .....	31
2.3	Variáveis da implementação .....	31
2.3.1	<i>Custo</i> .....	31
2.3.2	<i>Benefício líquido</i> .....	34
2.3.3	<i>Caso base</i> .....	36
2.3.4	<i>Análise de sensibilidade</i> .....	36
3	RESULTADOS .....	39
3.1	Indicadores técnicos .....	39
4	CONCLUSÕES.....	44
5	DISCUSSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS .....	47
	ANEXO A – ANEXO.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 O Sistema Único de Saúde

O Sistema Único de Saúde (SUS) brasileiro é formado pelo conjunto de todas as ações e serviços de saúde prestados por órgãos e instituições públicas federais, estaduais e municipais, da administração direta e indireta e das funções mantidas pelo poder público.<sup>1</sup> À iniciativa privada é permitido participar desse sistema de maneira complementar.

O SUS pode ser considerado uma das maiores conquistas sociais no Brasil e foi consagrado na Constituição de 1988.<sup>2</sup> As doutrinas e princípios clamados pela sociedade no século 20 são a base constitucional do SUS. São suas principais doutrinas: universalidade, equidade e integralidade. Seus princípios são: regionalização, hierarquização, resolubilidade, descentralização, participação popular e complementariedade do sistema privado.

A universalidade diz respeito ao direito de acesso universal à saúde. Poucos países possuem sistemas públicos de saúde universais. Qualquer indivíduo presente em território brasileiro, independente de cor, gênero, ideologia, idade ou condição financeira tem direito a acesso ao sistema público de saúde.

A equidade se opõe à igualdade. O pressuposto da equidade é o favorecimento da população com maior necessidade do sistema público de saúde. Por causa dessa doutrina, a distribuição geográfica dos serviços de saúde não é aleatória mas sim de acordo com a demanda da população. O Brasil é famoso por sua desigualdade social e a equidade tem como objetivo diminuir o efeito da desigualdade social sobre a saúde. Se as pessoas são desiguais então o tratamento deve ser desigual de acordo com esse princípio. Apesar da equidade se opor à igualdade seu objetivo final é a igualdade. A equidade não é exclusiva do SUS mas sim um princípio legal do direito inglês há mais de 200 anos.

A integralidade garante atendimento em todos os níveis e de todos os tipos necessários. As ações de promoção, proteção e recuperação de saúde não devem ser compartimentalizadas e as unidades prestadoras de saúde com seus diversos graus de complexidade formam um todo indivisível configurando um sistema capaz de prestar assistência integral. A integralidade, juntamente com a resolubilidade, pode ser considerada uma garantia de elevado custo e é usada frequentemente como argumento em ações para garantia de fornecimento de insumos ou serviços da saúde privada que não são oferecidos pelo SUS devido ao elevado custo e sua inviabilidade econômica.

A resolubilidade é a exigência de que, quando um indivíduo busca o atendimento ou quando surge um problema de impacto coletivo sobre a saúde, o serviço correspondente esteja capacitado para enfrentá-lo e resolvê-lo até o nível da sua competência.

A regionalização e descentralização são características de um sistema complexo auto-organizado. Os serviços devem ser organizados em níveis de complexidade tecnológica crescente, dispostos numa área geográfica delimitada e com a definição da população a ser atendida. Isto implica na capacidade dos serviços em oferecer a uma determinada população todas as modalidades de assistência, bem como o acesso a todo tipo de tecnologia disponível, possibilitando um ótimo grau de resolubilidade (solução de seus problemas). O acesso da população à rede deve se dar através dos serviços de nível primário de atenção que devem estar qualificados para atender e resolver os principais problemas que demandam os serviços de saúde. Os demais, deverão ser referenciados para os serviços de maior complexidade tecnológica.

A rede de serviços, organizada de forma hierarquizada e regionalizada, permite um conhecimento maior dos problemas de saúde da população da área delimitada, favorecendo ações de vigilância epidemiológica, sanitária, controle de vetores, educação em saúde, além das ações de atenção ambulatorial e hospitalar em todos os níveis de complexidade.<sup>3</sup>

A descentralização é entendida como uma redistribuição das responsabilidades quanto às ações e serviços de saúde entre os vários níveis de governo, a partir da idéia de que quanto mais perto do fato a decisão for tomada, mais chance haverá de acerto.

A participação da população é a garantia constitucional de que a população, através de suas entidades representativas, participará do processo de formulação das políticas de saúde e do controle da sua execução, em todos os níveis, desde o federal até o local. Essa participação deve se dar nos Conselhos de Saúde, com representação paritária de usuários, governo, profissionais de saúde e prestadores de serviço. Outra forma de participação são as conferências de saúde, periódicas, para definir prioridades e linhas de ação sobre a saúde.

### **1.1.1 Saúde baseada em evidências**

Saúde baseada em evidências é um paradigma recente que enfatiza a análise de resultados de estudos clínicos controlados como superiores à experiência clínica, raciocínio fisiopatológico e condutas de instituições com importante reputação.<sup>4-6</sup> Há muita esperança na capacidade de maximizar a utilidade esperada nas decisões relacionadas à saúde com a aplicação da saúde baseada em evidências.<sup>7</sup>

Tanto a saúde baseada em evidências quanto a estatística Bayesiana integram as evidências de modo sistemático com finalidade de auxílio à decisão. Muitos autores consideram que o processo de decisão Bayesiano pode ser considerado uma melhoria à técnica de maximização da utilidade esperada defendida pela saúde baseada em evidências.<sup>8,9</sup> Há muitos ganhos potencialmente resultantes da aplicação da saúde baseada em evidências do ponto de vista da tomada de decisão Bayesiana.

O processo de inferência Bayesiana também apresenta limitações. Apesar da estatística Bayesiana ser mais antiga que a estatística frequentista, por muito tempo aplicar

técnicas de inferência Bayesiana era impraticável devido a limitações em termos de capacidade computacional disponível a um custo razoável. Apenas recentemente a situação mudou a partir da publicação de algoritmos que tornaram possível até mesmo a condução de inferências Bayesianas complexas, como as redes Bayesianas.<sup>8</sup>

### 1.1.2 *Economia da saúde*

Um importante pressuposto da ciência da economia é a limitação de recursos. Para a sociedade, a forma como os recursos são usados irá determinar maiores ou menores limites ao desejo coletivo. A disponibilidade de leitos de UTI é limitada por seu elevado custo e por isso é essencial saber administrar esse recurso para uma máxima eficiência.

A Economia da Saúde (ES), especialidade recente no Brasil, procura aliar os conhecimentos das ciências da saúde ao conceito de eficiência da Economia com o objetivo de fornecer ferramentas para auxílio à decisão dos gestores de saúde, principalmente um melhor aproveitamento dos recursos frente às necessidades da sociedade. Desta forma, eficiência na aplicação dos recursos não se torna sinônimo de economia de verbas, mas sim a melhor alocação dos recursos disponíveis, levando em consideração segurança, eficácia e efetividade das intervenções avaliadas.<sup>10</sup> Frequentemente, a economia da saúde se confunde com a economia médica, um ramo da teoria da economia aplicado aos fenômenos e problemas associados com a saúde e os cuidados com a saúde.<sup>11</sup>

Na busca pela maximização da eficiência do setor saúde, uma das ferramentas utilizadas é a compreensão da utilização dos recursos, seus custos e os potenciais ganhos de saúde para a população. O conjunto dos estudos que utilizam estes conceitos pode ser chamado de avaliação econômica em saúde (AE).

A AE - um dos instrumentos da ES - é tida como uma ferramenta fundamental para as tomadas de decisão na área de saúde, auxiliando os gestores a observarem o real impacto das doenças na sociedade, tanto do ponto de vista de agravo à saúde, como as conseqüências econômicas para a sociedade decorrentes destas doenças.<sup>10</sup> Tem como objetivo principal auxiliar a tomada de decisão, visando uma melhor alocação dos escassos recursos disponíveis. A AE pode ser classificada como incompleta e completa, dependendo da forma como são mensurados custos e benefícios.

Na AE incompleta, temos os estudos do tipo “custo da doença” (*cost of illness*) e “comparação de custos” (*cost comparison*). Na avaliação do tipo “custo da doença”, estima-se e quantifica-se a utilização de recursos das diversas intervenções propostas para determinada doença, em um período de tempo.<sup>12</sup> Tem como objetivo conhecer o padrão de utilização destes recursos (adequados e/ou inadequados) conforme a melhor evidência tida como cientificamente válida no momento do estudo. Cada recurso é, por sua vez, custeado em termos monetários, o que permite, ao final, termos um custo total da doença para o sistema de saúde. Na avaliação do tipo “comparação de custos”, temos a possibilidade de comparar a utilização de recursos de duas intervenções pré-definidas

para uma determinada doença ou condição e, na seqüência, valorar os recursos utilizados, em termos monetários. A AE completa é o instrumento utilizado pela ES para a análise sistemática e comparativa de duas ou mais intervenções na área da saúde, considerando-se os custos e benefícios proporcionados.<sup>12</sup> São Tipos de AE completa: custo-minimização; custo-efetividade; custo-utilidade e custo-benefício.

A AE tipo custo-minimização é a análise realizada quando duas ou mais intervenções proporcionam o mesmo benefício, diferindo apenas em relação aos custos. Sendo assim, apenas os custos são parâmetros para as decisões, visto que os desfechos são os mesmos. Não é uma análise muito utilizada, uma vez que é raro encontrarmos intervenções que apresentem os mesmos benefícios comprovados cientificamente.

Custo-benefício é um tipo de análise na qual os resultados são estimados em valores monetários. Devido à dificuldade, complexidade e controvérsias em se valorar a vida humana e determinadas condições de saúde em termos monetários, ainda é uma análise raramente encontrada na literatura, mas esta abordagem apresenta a vantagem de conseguir comparar programas de saúde diferentes e com resultados diferentes ou até mesmo com programas não relacionados à saúde. Os resultados desta análise indicam o patamar mínimo a partir do qual os benefícios de uma intervenção ou programa de saúde compensam seus custos.

A AE tipo custo-efetividade, o mais comumente encontrado na literatura, é utilizado quando as intervenções apresentam desfechos clínicos semelhantes, porém diferenciando-se não só quanto aos custos, mas também quanto à extensão dos efeitos esperados.

A AE tipo custo-utilidade evidencia a preferência do indivíduo ou da sociedade por um estado de saúde ou desfechos específicos. O parâmetro mais comumente utilizado é o “*Quality Adjusted Life Years - QALY*” (sobrevida ajustada à qualidade de vida). Este tipo de análise vem adquirindo grande expressão em pesquisas atuais, pois possibilita a comparação entre diversas intervenções em diferentes doenças ou especialidades médicas, uma vez que o parâmetro que mensura o ganho de saúde pode ser medido em qualquer condição ou doença. Isto favorece o processo de tomada de decisão pelos gestores de diversas áreas, pois, teoricamente, possibilita uma alocação mais eficiente dos escassos recursos existentes.

Quando os desfechos são multidimensionais - por exemplo mudança no risco de eventos cardiovasculares - a técnica aplicada é a de avaliação de custos-e-consequências.<sup>13</sup>

É também de fundamental importância para a AE a perspectiva sob a qual a análise de custos é feita. Baseia-se em quem irá arcar com os custos referentes ao programa estudado, além de definir quais serão os recursos (custos) incluídos para a análise. Exemplos de pontos de vista são: do paciente, da instituição de saúde, do Ministério da Saúde, ou, geralmente, da sociedade.

Na perspectiva do paciente, por exemplo, são considerados os custos referentes às consultas (quando pagas por ele), ao transporte entre sua residência ou local de trabalho



até o local de tratamento, retorno, entre outros. A perspectiva da sociedade é a mais abrangente, pois considera todos os custos referentes ao programa, independente de quem irá pagar as despesas.

Em uma AE completa, os custos podem ser classificados como diretos, indiretos e intangíveis. Custos diretos estão diretamente relacionados aos recursos oriundos da intervenção. Custos indiretos não estão diretamente relacionados à intervenção. No entanto, podem gerar custos tanto para os pacientes e familiares, quanto para empregadores ou para sociedade (ex: a redução/falta de produtividade do usuário e/ou familiar, devido ao tempo despendido para participação no programa de saúde ou de doenças decorrentes). Custos intangíveis são os mais difíceis de serem medidos ou valorados, pois se referem ao custo do sofrimento físico e/ou psíquico. Dependem, unicamente, da percepção que o paciente tem sobre seus problemas de saúde e as conseqüências sociais, como o isolamento. Geralmente, estes custos não são inclusos nas análises de custos, visto que ainda existe grande controvérsia sobre a metodologia para obtenção dos mesmos.

A ES não tem como propósito determinar o que deve ser feito, mas fornecer dados consistentes para que os tomadores de decisão se encontrem suficientemente munidos de informações para melhor alocarem os recursos disponíveis.

Apesar de algumas medidas de saúde não necessitarem de justificativa econômica (como a indicação de necessidade de UTI pós-operatória de um indivíduo), o limite de recursos (como leitos de UTI) e a complexa interação das filas cirúrgicas podem indicar necessidade de desenvolvimento de ferramentas para solucionar a minimização dos custos (riscos à saúde) com a maximização dos benefícios (indicação de UTI para pacientes que necessitaram de intervenção específica de UTI) para o sistema de saúde.

## 1.2 Modelos de decisão clínica

A análise de decisão é um método usado para ajudar a fazer melhores escolhas, especialmente em decisões que envolvam incertezas, tanto em termos de benefícios à saúde como em termos de custos.<sup>14</sup> Ela utiliza uma abordagem gráfica que compara diferentes alternativas e estabelece valores a essas alternativas, contemplando incertezas (probabilidades) e custos em valores numéricos.<sup>15</sup> Na medicina, a análise de decisão foi utilizada, a princípio, para auxiliar o manejo clínico de pacientes com várias alternativas de tratamento, sendo que, atualmente tem um papel primordial na síntese dos dados em avaliações econômicas em saúde, através da estrutura da análise.<sup>16</sup> Logo, o modelo de decisão analítico é cada vez mais empregado para auxiliar os responsáveis pelas decisões a selecionar intervenções mais custo-efetivas e agregar elementos para o aprimoramento das políticas de saúde.<sup>17,18</sup>

A elaboração de modelos de decisão obriga a simplificar um problema real, procurando capturar a essência do problema de saúde. Simulações são úteis para avaliações quantitativas que permitam a análise sob situações de incerteza tanto das conseqüências

clínicas quanto econômicas das intervenções na saúde. Uma série de ferramentas, como a árvore de decisão ou os modelos de transição de Markov são usadas para essas simulações, visando à combinação da informação disponível para a síntese de um problema. Essa síntese deve facilitar o processo de decisão entre as alternativas estudadas. O objetivo maior da avaliação é calcular o valor esperado dos custos e desfechos associados a uma dada opção.

Um consenso recente em avaliação de tecnologias de saúde discute em detalhes as limitações de árvores de decisão e modelos de Markov para análise econômica de tecnologias de saúde.<sup>19</sup> As transições de fase podem ocorrer apenas no final de um ciclo e não deve haver interação entre agentes nem mudança de parâmetros do modelo como ocorre no caso dos sistemas de apoio à decisão adaptativos.

### ***1.2.1 Sistemas de apoio à decisão médica***

Muitos autores argumentam que apesar dos melhoramentos potenciais da teoria da maximização da utilidade esperada existem decisões divergentes devido aos vieses psicológicos das decisões tomadas sob situações de incerteza associados à falta de ferramentas adequadas para dar apoio aos cálculos para decisões complexas, como a inferência Bayesiana, e que sistemas clínicos de suporte à decisão baseados em computadores (SCBDCs) devem ser implementados para diminuir esses erros sistemáticos.<sup>8,18</sup>

Existem evidências consistentes de que os SCBDCs têm o potencial de melhorar a performance clínica dos médicos por várias razões.<sup>20-23</sup> O tipo mais simples de apoio que esses sistemas oferecem são lembrar os médicos de situações que eles esquecem por consequência do uso de heurísticas como interações entre drogas em prescrições e lembrar anestesiológicos de infundir os antibióticos profiláticos.<sup>23</sup> Também existem evidências que os SCBDCs têm potencial de até mesmo serem, em algumas situações, superiores aos médicos em prever desfechos de decisões como, por exemplo, hipotensão após a indução da anestesia.<sup>24</sup>

Destacam-se algumas preocupações práticas sobre a adoção dos SCBDCs. Muitos padrões são disponibilizados, a negociação e escolha do sistema por cada instituição de saúde é complexa e o custo de adoção de sistemas pode ser grande.

Na perspectiva do médico a centralização dos SCBDCs pelas instituições de saúde é um problema: ele terá que dividir sua experiência em vários sistemas independentes e algumas instituições não adotam SCBDCs porque é o médico quem tem maior interesse neles. Há também incerteza sobre se coletivização da experiência com outros profissionais de saúde para melhorar os critérios de decisão usando SCBDCs é viável da perspectiva de um único profissional: pode-se argumentar que outros profissionais não fazem diagnósticos ou avaliações de desfechos de qualidade ou que não registram os dados com fidelidade, influenciando negativamente o sistema. Outra fonte de incerteza é sobre a possibilidade da inserção de dados por patrocinadores da indústria no sistema para tornar as decisões tendenciosas.

### 1.2.2 Teorema de Bayes

Considerando uma quantidade desconhecida  $\theta$ , a informação que se dispõe sobre ela, resumida probabilisticamente como  $P(\theta)$ , pode ser aumentada observando-se uma quantidade aleatória  $X$  relacionada com  $\theta$ . A distribuição amostral  $p(x|\theta)$  define essa relação.  $P(\theta)$  é chamada informação *a priori*.

Para um valor fixo de  $X$  a função  $l(\theta; X) = p(x | \theta)$  expressa a verossimilhança de cada um dos possíveis valores de  $\theta$ . Note que  $p(X)$  não depende de  $\theta$ , funcionando como uma constante normalizadora. As duas fontes de informação, a informação *a priori* e a verossimilhança são combinadas levando à distribuição *a posteriori* de  $\theta$ ,  $p(\theta | X)$ .

Aplicando o teorema de Bayes apenas a distribuição *a priori* é necessária para inferência e casos isolados podem ser usados facilmente para atualização das crenças. Somado à simplicidade da interpretação essas propriedades tornam a modelagem de sistemas de apoio à decisão Bayesianos uma tarefa fácil e efetiva.

### 1.2.3 Inferência Bayesiana

A abordagem Bayesiana pressupõe um conhecimento inicial, definido como conhecimento *a priori*  $P(\theta)$  e um conhecimento *a posteriori*  $P(\theta | x)$ . O conhecimento *a priori* é o que cada indivíduo traz consigo de experiências passadas. O conhecimento *a posteriori* é o obtido à medida que novas experiências são realizadas. Desta forma, as probabilidades associadas a um evento são definidas previamente e atualizadas a cada nova informação.

A inferência Bayesiana é alternativa à inferência frequentista. A inferência frequentista é a mais usada atualmente devido a limitações tecnológicas, no entanto, ela apresenta importantes limitações, o que resulta em uso cada vez mais frequente da inferência Bayesiana.

A inferência frequentista não nos permite fazer afirmações sobre os parâmetros de um processo estatístico. Por exemplo, se o intervalo de confiança de 95% de uma média de uma distribuição normal é [50kg-100kg] não podemos afirmar que há uma probabilidade de 95% da média estar entre [50kg-100kg]. O que se pode afirmar é que se o mesmo procedimento de coleta da amostra for realizado inúmeras vezes, em 95% das vezes o valor da média verdadeira (da população total) estará dentro do intervalo de confiança. Em contraste o intervalo de credibilidade (Bayesiano) de 95% de [50kg-100kg] significa que há uma probabilidade de 95% do peso estar entre 50kg e 100kg.

O que complica a discussão sobre as desvantagens da inferência frequentista é o uso corrente do valor  $p$  defendido por Fisher e do valor  $\alpha$  crítico (geralmente 0,05) sugerido por Neyman e Pearson.<sup>25,26</sup> Hubbard e Bayarri resumem e contrastam esses dois paradigmas:<sup>27</sup>

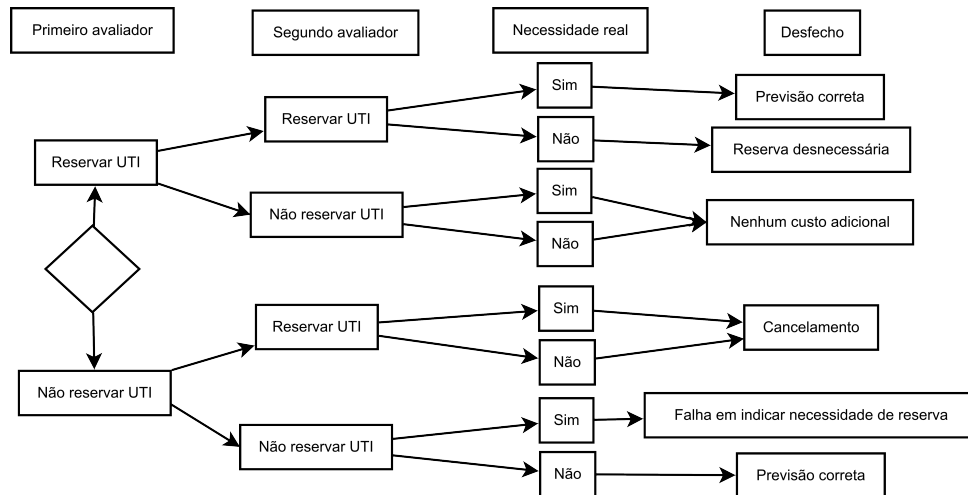
"O nível de significância do valor p proposto por Fisher se refere à probabilidade de observar dados tão ou mais extremos como o analisado sob a ótica da hipótese nula ( $H_0$ ). Esse valor p dependente dos dados tem um papel epistêmico ao prover uma medida de evidência indutiva contrária à  $H_0$  em experimentos isolados. Ele é muito diferente do nível de significância  $\alpha$  em um teste de hipótese de Neyman-Pearson. No teste Neyman-Pearson, o foco é minimizar o erro tipo II ou erro  $\beta$  (aceitação falsa de uma hipótese nula) sujeito a limites de erro tipo I ou erro  $\alpha$  (rejeição errada de hipótese alternativa). Essa minimização de erro é aplicável apenas a longo prazo de coleta de dados e não a experimentos individuais e é uma prescrição de comportamentos, não um meio de se obter evidências."

Fica claro, portanto, que a abordagem de Fisher é muito diferente da abordagem de Neyman e Pearson. Por outro lado a maior parte dos pesquisadores acredita que houve fusão dos conceitos e interpretam o valor p tanto como medida de evidência quanto como medida de erro de repetição. Hubbard afirma que esse tipo de confusão tomou tamanha dimensão que tornou a aplicação clássica de testes estatísticos algo sem significado para pesquisadores.<sup>27</sup>

Pode-se afirmar que a inferência frequentista baseia-se em dados nunca observados porque o valor p é a probabilidade de observar dados no mínimo tão extremos quanto os realmente observados quando comparados à hipótese nula.<sup>28</sup> É impossível selecionar os melhores preditores usando estatística frequentista ao contrário do que seria desejável nas pesquisas da área da saúde: qualquer problema estatístico do ponto de vista frequentista pode ser resolvido de várias formas com precisões semelhantes sem contudo ser possível afirmar qual modelo é melhor.<sup>28</sup>

O valor p não quantifica a evidência estatística e não se aplica a modelos não hierárquicos. A evidência de  $p=0,05$  em uma amostra com 10 casos não é a mesma de um  $p=0,05$  em uma amostra com 50 casos, essa interpretação é enviesada. Ao se considerar por exemplo, uma situação em que é possível testar como hipótese nula se as duas distribuições são iguais e simultaneamente é possível testar se as duas distribuições são diferentes, temos um exemplo de modelo não hierárquico. É possível que testando as duas combinações de hipóteses ambas sejam rejeitadas ou ambas sejam aceitas simultaneamente e mesmo que apenas uma seja testada sua interpretação é muito difícil.<sup>28</sup>

Há ainda outros problemas a serem discutidos sobre a inferência frequentista contudo os problemas relacionados à interpretação são os de maior impacto sobre o processo de decisão e é por esse motivo que sistemas de apoio a diagnóstico médico usam mais frequentemente modelos Bayesianos que frequentistas.<sup>29</sup>



**Figura 1 – Fluxograma das decisões sobre necessidade de reserva de leito de UTI para pós-operatório.**

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

#### **1.2.4 O sistema acoplado de decisões sobre reserva de leito de UTI**

Com a evolução das ciências da saúde é possível submeter pacientes de maior risco a procedimentos cirúrgicos mais extensos porém esse fato também aumentou nos últimos 20 anos o número de cancelamentos de cirurgias devido a necessidade de avaliações adicionais solicitadas pelos anesthesiologistas ou ao grande risco cirúrgico de pacientes não detectado por cirurgiões. No mundo inteiro é cada vez mais comum a existência de clínicas de avaliação ambulatorial pré-operatória realizada por médicos anesthesiologistas para evitar esses cancelamentos.<sup>30-32</sup>

Por motivos logísticos, na maior parte dos países como no Brasil, o anesthesiologista que realiza a avaliação pré-operatória não precisa ser o responsável pela execução da anestesia (resolução CFM 1802 de 2006, artigo 1º-I-C).<sup>33</sup> Nesse sistema é frequente que a avaliação e decisões de planejamento sejam realizados por profissionais diferentes dos que executarão o procedimento e que irão avaliar os desfechos.

Uma das decisões mais difíceis a ser tomada na avaliação pré-operatória ambulatorial é a necessidade de reserva de leito de unidade de terapia intensiva (UTI) para o período pós-operatório.<sup>32</sup> Uma decisão errada pode ter como consequência o cancelamento de uma cirurgia, aumento do tempo de espera pela liberação de um leito de UTI em sala operatória por um leito de UTI não programado ou mesmo aumentar o atraso até a data da cirurgia porque leitos de UTI são recursos escassos. Devido à escassez, a reserva de leitos de UTI para uso em pós-operatório é uma rotina que garante o fluxo cirúrgico apesar da incerteza da disponibilidade não programada destes leitos. Existem pouco mais de 18.000 leitos de UTI ativos no SUS de acordo com o último relatório de gestão da Secretaria de Atenção à Saúde do Ministério da Saúde (SAS-MS).<sup>34</sup>

Na avaliação pré-operatória um médico anestesiológico deve decidir sobre a necessidade reserva de leito de UTI no pós-operatório usando como parâmetros os dados clínicos específicos de cada paciente. No centro cirúrgico, momentos antes da cirurgia, o paciente é avaliado pela segunda vez, mas possivelmente por outro anestesiológico, para a decisão de necessidade de reserva de leito de UTI. Isso acontece porque é o anestesista executor quem tem a responsabilidade sobre o desfecho do paciente e é ele quem deverá cuidar do paciente até seu encaminhamento para leito de UTI ou de enfermaria.<sup>33</sup> Caso tenha sido decidido por não necessidade na primeira avaliação e por necessidade na segunda avaliação o procedimento cirúrgico é cancelado se não houver recurso disponível.

A figura 1 resume o fluxo de cada paciente. O primeiro avaliador decide por necessidade ou não de reservar leito de UTI. O segundo avaliador, que pode ser o mesmo anestesista da primeira avaliação, usa os mesmos parâmetros para repetir a decisão. Se o primeiro avaliador decidiu por não necessidade de reserva de leito de UTI e o segundo decidiu diferente a cirurgia é cancelada. Em todas as outras situações a cirurgia é realizada e o desfecho passa a ser conhecido apenas pelo segundo avaliador. Caso o primeiro avaliador tenha errado e o paciente não precise usar o leito o dano que ocorreu foi o atraso desnecessário da execução da cirurgia porque o fluxo de cirurgias da fila de pacientes com necessidade de reserva de leito de UTI é mais lento. Caso o primeiro avaliador e o segundo errem e haja necessidade de repouso pós-operatório em leito de UTI o paciente irá usar a sala operatória até a disponibilização de um leito de UTI não previsto o que pode implicar em cancelamentos de outras cirurgias ainda não executadas. De acordo com um grupo de pesquisadores até 77% das admissões em UTIs têm como objetivo monitorização e apenas 10% destes pacientes terão necessidade de intervenções específicas de UTI.<sup>35</sup>

### **1.2.5 *Auxílio à decisão para reserva de leitos de UTI***

Os SCBDCs são potenciais ferramentas para o auxílio à tomada de decisões sobre reserva de leito de UTI para o pós-operatório. Ao comparar as duas abordagens possíveis, se desconsiderarmos os erros da informação fornecida ao sistema, espera-se que os SCBDCs que usem uma única base de dados centralizada sejam mais precisos que aqueles baseados apenas na experiência de um único usuário porque a acurácia dos modelos adaptativos tende a aumentar com a entrada de dados sendo esse tipo de sistema classificado por alguns autores como inteligência artificial porque estes definem a atualização de crenças dos modelos como aprendizado de máquina.

Define-se para este estudo que modelos baseados apenas na experiência de um usuário são chamados modelos descentralizados e que modelos baseados em um banco de dados único são modelos centralizados.

Apesar de se esperar maior acurácia nos modelos centralizados as incertezas sobre a qualidade dos dados e o potencial menor custo de manutenção dos modelos descentralizados além de sua capacidade de adaptação a realidades diferenciadas tornam difícil a escolha sobre qual tipo de modelo implementar.

### 1.2.6 *Caracterização do modelo de decisão sobre reserva de leitos de UTI*

No modelo de decisão sobre necessidade de reserva de leitos de UTI para o período pós-operatório, a presença de interferência entre a avaliação do primeiro agente com o desfecho observado apenas pelo segundo, combinada com a variedade e numerosidade de agentes (grande quantidade de agentes) com experiências diferentes mas com regras semelhantes de tomada de decisão em um sistema dinâmico e adaptativo e sem controle central, caracteriza um sistema complexo, de acordo com uma avaliação filosófica recente.<sup>36</sup> Na mesma análise conclui-se que as características de não linearidade, caos e numerosidade não são necessárias nem suficientes para caracterizar um sistema complexo apesar de sua prevalência ser grande nesses sistemas.<sup>36</sup>

Antes de tudo é necessário definir nesse texto que um sistema complexo não é sinônimo de um sistema complicado. Um sistema complicado, apesar de significar literalmente algo complicado, é um sistema dotado de um valor de julgamento pessoal. Certamente para um mesmo indivíduo num mesmo momento há consenso sobre o que é complicado contudo isso pode não ser verdade posteriormente ou para outras pessoas portanto isso não pode ser considerado uma definição de científica que presume uma linguagem comum. Sistemas complexos por outro lado têm na ciência características que independem de opinião.

Algumas características necessárias para dizer que um sistema é complexo já estão bem definidas apesar de não haver consenso em uma definição formal única do que são os sistemas complexos. Isso ocorre com muitas manifestações naturais e também na medicina.

Auto-organização pressupõe ausência de controle central. Sistemas auto-organizados são aqueles cujas características tendem a ser estáveis ou a retornar a um determinado equilíbrio apenas pela forma como suas partes interagem de modo pré-determinado. Um exemplo clássico de sistema auto-organizado é o sistema de coagulação no qual após uma lesão endotelial determinadas células circulantes e enzimas interagem com os fatores teciduais da área lesada desencadeando um processo que faz emergir coágulos que impedem a perda dos componentes sanguíneos pela região da lesão estabilizando novamente o sistema circulatório. Nesse sistema não há participação de um agente único organizador como o sistema nervoso central comandando e organizando a forma, local e resposta de coagulação.

A robustez é a soma de características de auto-organização no sistema que o torna estável apesar das perturbações externas. É comum que a robustez seja válida até um determinado limite a partir do qual existe uma mudança brusca de estado mesmo com uma pequena perturbação. Na física esse fenômeno de mudança brusca de estado após um amplo espectro de perturbação é conhecido como transição de fase. Isso ocorre por exemplo com a água: ao resfriar a água de 20 para 15, 10 ou 5 graus celcius não há mudança nas características gerais da água contudo ao resfriar de 1 grau para -1 graus

celcius (toda a água estudada) há uma mudança brusca de estado líquido para sólido. Na medicina esse fenômeno é observado em estudos de diversos sistemas como as epidemias de cólera nas quais a partir de um certo ponto há mudança do estado de equilíbrio do sistema de focos contidos de infecção para epidemia disseminada.<sup>37</sup>

Entre as implicações da identificação do sistema como complexo pode-se esperar auto-organização, não linearidade e robustez. Isso significa que algumas características que emergem do sistema só podem ser explicadas por sua complexa interação e que a decomposição do sistema não é uma estratégia eficaz para sua modelagem. A modelagem de um agente médio, como na teoria econômica clássica, tornaria impossível a modelagem de sistemas como esse.

O sistema de decisões acopladas sobre a necessidade de leito de UTI em pós-operatório por médicos anesthesiologistas pode ser considerado um sistema complexo: é um sistema dinâmico composto por muitos agentes diferentes (anesthesiologistas) que tomam decisões de forma descentralizada e que são influenciados pela decisão de outros. É muito difícil prever o desfecho (a acurácia da decisão) de perturbações nesse sistema.

### 1.3 Modelagem de sistemas complexos

O estudo dos sistemas complexos tem sua origem na teoria do caos cuja origem é o trabalho de um matemático francês chamado Henri Poincaré. O caos é popularmente julgado como algo extremamente complicado e aleatório. O sistema caótico é, contudo, determinista apesar de ser difícil de prever em longo prazo com acurácia. Teoricamente, com o conhecimento perfeito das condições iniciais e equações que governam um sistema caótico é possível prever com máxima precisão a evolução de cada passo do sistema.

Já havia sido descrito por Poincaré em 1882 que alguns sistemas dinâmicos cuja evolução é governada por equações de Hamilton poderiam ser caóticos. Infelizmente isso foi considerado pelos estudiosos da época apenas como curiosidade matemática e demorou 70 anos até que em 1963 o meteorologista E. N. Lorenz demonstrar que mesmo sistemas simples de 3 equações não lineares, de primeira ordem e acopladas poderiam apresentar comportamento caótico.<sup>38,39</sup>

Com o desenvolvimento da microeletrônica e aumento do poder computacional, experimentos refinados foram realizados com frequência cada vez maior de forma que hoje sabe-se que o caos é um fenômeno abundante na natureza e nas manifestações humanas.<sup>40</sup> Nota-se que a não linearidade é necessária porém não suficiente para o comportamento caótico (equações diferenciais lineares podem ser resolvidas por transformadas de Fourier e não geram comportamento caótico). O comportamento caótico não decorre de fontes externas de ruído ou de um número infinito de graus de liberdade (nas equações de Lorenz há 3 graus de liberdade). A origem da irregularidade caótica é a propriedade do sistema de separar trajetórias inicialmente próximas com velocidade exponencial.



Torna-se praticamente impossível prever o comportamento a longo prazo desses sistemas porque na prática só é possível definir um estado inicial com uma precisão finita e os erros aumentam de forma exponencial. Ao tentar resolver um sistema caótico em um computador os resultados a longo prazo dependem extremamente na precisão dos dígitos do parâmetro inicial do modelo e como os dígitos nos números irracionais são distribuídos de forma irregular, a trajetória torna-se caótica. Lorenz (que era meteorologista) nomeou como efeito borboleta essa dependência do sistema em suas condições iniciais cujo objetivo era previsão do tempo porque, de acordo com suas equações, diferenças tão pequenas quanto as geradas pelo simples bater de asas de uma borboleta poderiam gerar efeitos tão grandes quanto furacões.<sup>38</sup>

A teoria da complexidade não é sinônimo de teoria do caos. Ela situa-se entre a ordem determinística do caos e a aleatoriedade.<sup>41</sup> É por isso muitas vezes descrita como a beira do caos.<sup>42</sup> Quando são estudados sistemas com comportamento caótico com parâmetros não determinísticos como probabilidades, não se trata de sistemas aleatórios nem sistemas caóticos.<sup>43</sup> Esse é o campo de estudo dos sistemas complexos.<sup>43</sup>

### ***1.3.1 Teoria dos sistemas complexos e avaliações de tecnologias de saúde***

Estudos de avaliações econômicas costumam ser feitos com modelos deterministas (como árvores de decisão) usando parâmetros probabilísticos.<sup>44</sup> A análise de variabilidade é simulada usando o modelo de coorte de Markov variando estados iniciais, também chamado método de microsimulação, Monte Carlo de primeira ordem ou simulação de eventos discretos.<sup>44,45</sup> Em uma importante referência para pesquisas na área de avaliação econômica em saúde no Brasil, Kim *et cols* afirmam que a coorte de Markov pressupõe que a interação entre indivíduos não altera os parâmetros das regras individuais.<sup>44</sup> Eles afirmam também que entre as técnicas de modelagem mais flexíveis e de mais fácil compreensão encontra-se a modelagem baseada em agentes que tem como desvantagem a necessidade de conhecimentos de programação associados ao conhecimento técnico do sistema de saúde a ser modelado e aos conhecimentos de probabilidade e estatística.<sup>44</sup> Para modelagem de árvores de decisão e coortes de Markov existem diversos aplicativos computacionais comerciais disponíveis no mercado.

Outra opção, mais usada por profissionais da área de administração, é a chamada modelagem de eventos discretos que é muito semelhante à modelagem baseada em agentes.<sup>44</sup> Sibers *et cols* afirmam que, apesar da simulação de eventos discretos ter sido a principal forma de modelagem na pesquisa operacional, a modelagem baseada em agentes é mais simples e flexível sendo capaz de substituir completamente esta modalidade.<sup>46</sup>

É pressuposto tanto das coortes de Markov como da simulação de eventos discretos que os parâmetros dos atores sejam estáticos. Se esses modelos apresentarem interações capazes de gerar caos eles serão modelos de sistemas complexos. Por este motivo interações entre os parâmetros são evitadas em avaliações econômicas e em pesquisas operacionais:

há pouca interface com a teoria dos sistemas complexos.<sup>44,46</sup> Para o estudo de custo e modelagem do sistema de decisões sobre reserva de leito de UTI que apresenta características geradoras de caos é necessário combinar as duas áreas de conhecimento.

Vários métodos foram desenvolvidos para modelagem de sistemas complexos. Para a modelagem da interação de muitos componentes adaptáveis que obedecem regras simples de comportamento recomenda-se a modelagem baseada em agentes, principalmente em avaliações econômicas para cuidados com a saúde.<sup>47-49</sup> A modelagem baseada em sistemas de equações diferenciais torna-se complicada porque frequentemente converter sistemas complexos baseados em multiagentes em sistemas de equações diferenciais requer o uso de uma quantidade muito grande de equações o que dificulta a análise e manipulação do sistema.

### ***1.3.2 Modelagem baseada em agentes***

A modelagem baseada em agentes é uma abordagem nova para sistemas compostos por agentes autônomos e com interação.<sup>50</sup> Promete-se que essa técnica de modelagem terá ampla aplicação como uso em tomadas de decisões em grandes negócios até em tomadas de decisões na área de saúde.<sup>50</sup> Alguns autores chegam a afirmar que a modelagem baseada em agentes é a terceira forma de se produzir conhecimento científico além dos processos de indução e dedução.<sup>51</sup> Os avanços tecnológicos como o aumento do poder computacional viabilizam o uso dessa técnica em novas aplicações.<sup>52</sup>

O modelo baseado em agentes tem como unidade básica um agente. Cada agente tem propriedades variáveis que são parâmetros para suas regras de interação. Mesmo que as regras de interação de todos os agentes seja a mesma, a diferença entre os parâmetros torna o comportamento emergente dessa interação de regras simples semelhante ao de uma interação de vários agentes com regras diferentes. A partir da simulação de unidades de baixo nível (micro) é possível entender a emergência de fenômenos complexos de alto nível (macro). É comum autores de revisões sobre sistemas baseados em agentes se referirem à emergência de fenômenos complexos afirmando que o todo é maior que a simples soma das partes.<sup>50</sup>

Por se tratar de um sistema complexo, o sistema baseado em agentes é composto não apenas pelos agentes e suas regras de comportamento mas também por suas propriedades emergentes.

Entre as plataformas para modelagem baseada em agentes o NetLogo é uma plataforma gratuita, criada com intenções educacionais e acadêmicas, que permite programação em alto nível e com a documentação mais completa.<sup>53</sup> Entre suas desvantagens está a pior performance (velocidade) entre os principais ambientes para modelagem baseada em agentes.<sup>53</sup> Considerando o meio interdisciplinar entre saúde, economia e teoria dos sistemas complexos para modelagem de sistemas que não exigem grande esforço computacional essa pode ser eleita como uma das melhores ferramentas gratuitas disponíveis atualmente.<sup>53</sup>

## 2 MÉTODO

Para estudar o custo-benefício do modelo descentralizado quando comparado ao centralizado foram estudadas coortes simuladas de pacientes a serem operados com a técnica de modelagem baseada em agentes devido ao fato do sistema ser caracterizado como complexo. Simulações de Monte Carlo foram usadas para estimar o benefício monetário derivado de melhor utilização dos recursos da organização de saúde dos modelos com critério de parada erro  $< 1\%$  pela técnica da média dos blocos. A perspectiva do estudo é do Sistema Único de Saúde (SUS) do Brasil. A tabela 1 descreve os 7 elementos principais do modelo de acordo com o mais recente protocolo para descrição de modelos baseados em agentes. A figura 2 mostra o fluxo do modelo.

**Tabela 1 – Descrição padronizada dos principais elementos do modelo.**

Característica	Descrição
Propósito	Avaliar custo-benefício do modelo descentralizado e do modelo centralizado de apoio à decisão sobre reserva de UTI para pós-operatório.
Variáveis de custeio e desfechos	Custo em R\$. Proporção de cancelamentos de cirurgias, indicações necessárias não realizadas e número de indicações desnecessárias de reserva de leito de UTI.
Conceitos	Modelagem baseada em agentes com decisão a partir de inferência Bayesiana e atualização de crenças Bayesiana.
Inicialização	Custo inicial zero. Distribuição uniforme de probabilidade de necessidade de UTI como distribuição à <i>priori</i> .
Parâmetros	Número de avaliadores, proporção de pacientes com risco ASA I, II e III.
Modelos	Centralizado e descentralizado.

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

Todos os custos foram estimados em Reais (R\$) no ano de 2014 (R\$ 1 = \$0,43 dólares americanos aproximadamente).

Para este estudo os modelos foram escrito no programa NetLogo, um programa código livre dedicado à modelagem de sistemas complexos.<sup>54</sup> Os dados gerados pelos modelos foram exportados no formato separado por vírgulas (CSV) e importados para o pacote estatístico R da CRAN, um pacote estatístico código livre.<sup>55</sup>

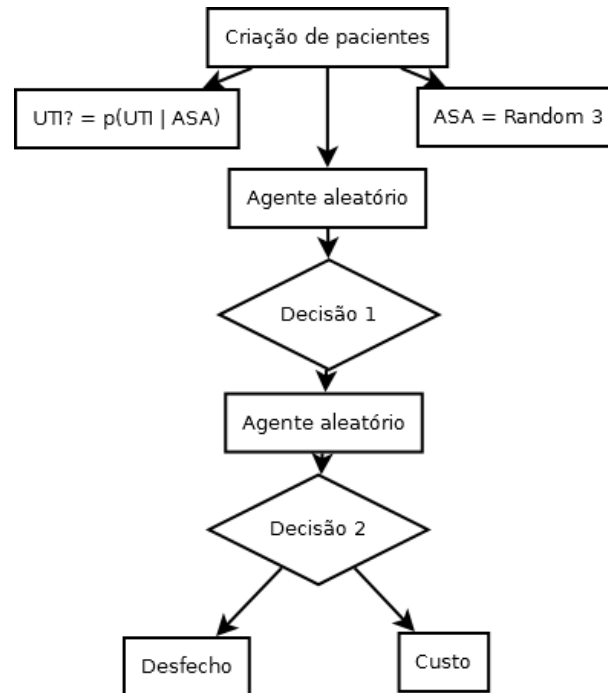


Figura 2 – Fluxo do modelo.

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

No modelo os pacientes gerados aleatoriamente com uma variável ASA que representa a classificação de risco pela sociedade americana de anesthesiologistas (ver tabela 2) porque é o preditor de necessidade de UTI mais usado no Brasil e no mundo e que, apesar de simples, é validado como um dos mais acurados.<sup>32</sup> A variável ASA para este estudo pode ter valor I, II ou III, apesar de ter valor até VI na classificação americana, porque pacientes ASA > III já têm indicação certa de necessidade de UTI no pós-operatório e modelos preditores são inúteis nessa situação.

Tabela 2 – Classificação ASA.

Classificação	Significado
ASA-I	Paciente sem doenças sistêmicas
ASA-II	Paciente com doença sistêmica controlada
ASA-III	Paciente com doença sistêmica não controlada

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

De acordo com os relatórios anuais de gestão da Secretaria de Atenção à Saúde do Ministério da Saúde (SAS-MS) são realizadas cerca de 379.000 cirurgias eletivas por ano no Brasil pelo SUS.<sup>34</sup> De acordo com o Conselho Federal de Medicina há no Brasil 8.502 registros primários de médicos anestesistas ativos no ano de 2014 até o mês de junho.<sup>56</sup>

Isso significa que em média cada anestesista avalia 44,5 pacientes por ano.

Simular o sistema centralizado equivale à simulação da implementação do modelo descentralizado com apenas um único médico avaliador porque os parâmetros de decisão serão os mesmos para todos os médicos. Para comparar o sistema centralizado com o descentralizado foram realizadas em média avaliações de 45 pacientes por ciclo (porque a média de pacientes avaliados é 45 pacientes por anestesista por ano). Cinquenta avaliadores é o percentil 99% do número de anestesistas em um mesmo serviço no SUS que é encontrado em um hospital em Minas Gerais e em 4 em São Paulo.<sup>34</sup> É importante limitar o número de anestesistas que interagem no modelo porque supor que cada paciente avaliado no Brasil tem igual probabilidade de ser avaliado por qualquer um dos outros mais de 8.500 anestesistas brasileiros não corresponde à realidade que é ser avaliado nas duas etapas por anestesistas do mesmo hospital. Outro problema de supor número maior de médicos no modelo é a superestimação da demora até a estabilização do modelo. Ao considerar o percentil 99% já se considera o pior cenário que é o de adaptação do modelo em um grande hospital.

## 2.1 Desfechos

Como mostra a figura 1, os desfechos possíveis são não haver custo adicional, custo decorrente de reserva desnecessária, custo de cancelamento de cirurgia e custo de falha ao não indicar uma reserva que foi necessária. O benefício decorrente de evitar uma reserva desnecessária será representado por  $B_d$ , o benefício decorrente de evitar o cancelamento de uma cirurgia por  $B_c$  e o benefício decorrente de evitar a falha ao não indicar uma reserva que foi necessária será representado por  $B_f$ .

## 2.2 Modelagem

### 2.2.1 Estado inicial do modelo implementado

O estado inicial do modelo pressupõe uma distribuição de probabilidade *a priori*. Muitos autores afirmam que para que o modelo seja imparcial a crença *a priori* deverá ser do tipo não informativa, pelo princípio da indiferença.<sup>57-61</sup> Por este motivo a probabilidade de todas as possibilidades deve ser a mesma a priori. Um exemplo de distribuição *a priori* não informativa é a distribuição beta cujos dois parâmetros  $a$  e  $b$  sejam iguais a um. A função densidade da distribuição beta é:

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} = \frac{(1-x)^{b-1} x^{a-1}}{B(a,b)} \quad (2.1)$$

onde  $\Gamma$  é a função gama:

$$\Gamma(z) = \int_{\infty}^0 t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2.2)$$

e B a função beta:

$$B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1}(1-t)^{b-1} dt \quad (2.3)$$

Na implementação em Netlogo, foram definidas 3 variáveis para cada agente: *priorASAI*, *priorASAI* e *priorASAI*. Cada variável foi definida como uma lista de 101 números representando a densidade de probabilidade de zero a 1. Considerando a discretização da densidade de probabilidade:

$$P(ASA) = \sum P(UTI, ASA) \quad (2.4)$$

Para a atualização de crenças, cada variável que representa a densidade de probabilidade é multiplicada pela verossimilhança (equação 2.6) e normalizada posteriormente, como no teorema de Bayes:

$$P(UTI | ASA) = \frac{P(UTI, ASA)}{P(ASA)} = \frac{P(ASA | UTI)P(UTI)}{P(ASA)} \quad (2.5)$$

$$P(UTI | ASA) = \frac{P(UTI, ASA)}{P(ASA)} = l(UTI; ASA)P(UTI) \quad (2.6)$$

### 2.2.2 Estabilidade do modelo implementado

Variáveis de modelos dinâmicos adaptativos podem ser convergentes, divergentes, periódicas ou caóticas. Variáveis convergentes são aquelas cujo valor esperado é único quando o número de simulações tende ao infinito. Variáveis periódicas são aquelas cujo valor é cíclico, um mesmo padrão de aumento e diminuição com repetição de valores se repete indefinidamente. Variáveis caóticas são semelhantes às periódicas: seu ciclo é determinista porém o tamanho do ciclo é infinito. Todas as outras variáveis são divergentes.

Um modelo implementado estável é aquele cuja variável referência (por exemplo o custo) já entrou em um ciclo, convergência suficiente do limite esperado ou em caos. Um modelo divergente não é considerado estável. Espera-se convergência em modelos de crença Bayesiana e os modelos estudados deverão ser comparados antes e depois da convergência suficiente.

A margem de erro do valor esperado no limite de simulações tendendo ao infinito é inversamente proporcional ao número de simulações.<sup>62</sup> Convergência suficiente em simulação significa atingir erro abaixo de determinado valor. Para este estudo um erro < 1% foi considerado como sem significado prático. Esse erro é usado como critério de interrupção das simulações e torna viáveis as análises.

Vários métodos de convergência são possíveis para simulações de Monte Carlo. É comum em avaliações econômicas e mesmo em consensos sobre avaliações econômicas especificar um número fixo de simulações, como 10.000 simulações.<sup>63-68</sup> Técnicas guiadas pelos dados incluem o método de Sobol, o método de Morris, análises de regressão linear, regras de dimensão fixa relativa e análise de sensibilidade regional.<sup>62,67,69</sup>

Entre as técnicas mais precisas e computacionalmente mais eficazes para convergência em simulações de Monte Carlo encontra-se a média dos blocos (do inglês *Batch Means*).<sup>62,70-72</sup>

### 2.2.3 Média dos blocos

Para verificar, a partir de um ponto em diante a convergência do erro, a técnica da média dos blocos foi escolhida. Nesta técnica a sequência de valores a cada simulação da variável de desfecho é quebrada em blocos de igual tamanho, tamanho  $b > 1$ . Suponha que  $Y$  seja a variável de desfecho (custo). Considere  $k$  o número total de blocos e  $j \in [1, k]$  e  $m$  o número total de valores em todas as simulações. Para cada bloco calcula-se a média:

$$Z_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{(i-1)m+j} \quad (2.7)$$

e a variância:

$$V_m = \frac{1}{b-1} \sum_{i=1}^b (Z_i - Z_b)^2 \quad (2.8)$$

onde a média amostral é:

$$Z_b = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b Z_i \quad (2.9)$$

Dado o teorema do limite central é possível supor que as médias das amostras terão distribuição aproximadamente normal. O passo seguinte é calcular o valor crítico  $V_c$  para  $k-1$  graus de liberdade e intervalo de confiança de 95%. Quanto maior for o número de simulações, mais estreito será o intervalo de confiança. Ao atingir um erro  $< 1\%$  a simulação é interrompida.<sup>70</sup>

Os últimos 100 valores de custo foram usados como vetor para o cálculo da média dos blocos. Para critério de parada de número de simulações o vetor contendo o valor de custo final de todas as simulações foi usado para o cálculo da média dos blocos. O tamanho do bloco foi definido como  $\sqrt{\text{tamanhodaamostra}} = \sqrt{100} = 10$  como sugerido em pesquisas anteriores para uma melhor performance computacional.<sup>62,70</sup> O valor esperado para uma distribuição t com  $b-1 = 9$  graus de liberdade e margens de  $\alpha/2 = 0,01/2 = 0,005$  é a média  $\pm 2,28\sqrt{V_m/k}$ . O valor 2,28 é o valor da estatística t para 9 graus de liberdade e um intervalo de confiança de 95%.

## 2.3 Variáveis da implementação

### 2.3.1 Custo

Para a análise do custo de cada decisão é importante estimar o custo adicional, ou seja, o custo acima do mínimo necessário para a realização segura do processo de cuidado à saúde. Os custos necessários ou inevitáveis serão considerados como nulos. A perspectiva dos custos usados nesse estudo é a perspectiva do Sistema Único de Saúde e apenas os custos diretos serão considerados.

A única avaliação sistemática de custo de um cancelamento de uma cirurgia em um hospital público brasileiro foi publicada em 2007 e essa unicidade foi pesquisada e confirmada em uma revisão bibliográfica sobre os custos de cancelamentos cirúrgicos

publicada em 2013.<sup>73,74</sup> O valor de R\$29,54 por cirurgia cancelada foi calculado usando os chamados custos de *overhead*.<sup>68</sup> Quando insumos e recursos utilizados em diversas atividades são compartilhados por diferentes departamentos, intervenções ou programas de saúde é realizado o rateio do custo (divisão do valor total pelo total produzido) e esse custo é chamado custo de *overhead* (custo de atividades-meio da organização). No caso de cirurgias canceladas o custo para preparo da sala operatória que será aproveitado para as seguintes cirurgias, o valor do salário dos profissionais envolvidos e o custo do material processado pelos centros de material e esterilização são reaproveitados parcialmente e por isso o custo total do cancelamento de uma cirurgia é baixo no SUS (R\$29,54).

Usando dados do DATASUS (Sistema de Gerenciamento dos Recursos Financeiros - SISGREF, Sistema de Gerenciamento da Tabela de Procedimentos, Medicamentos, Órteses, Próteses e Materiais Especiais - SIGTAP e Sistema de Informações Hospitalares - SIH) combinados com dados do portal transparência estadual do Distrito Federal foi possível calcular esse custo com confiança de 95% de aproximadamente R\$15 a R\$45, média de R\$30 e desvio-padrão de R\$7,5 devido a uma ampla variação salarial dos médicos e dos enfermeiros, cuja distribuição é aproximadamente normal porque o teste de Shapiro-Wilk apresenta  $p=0.89$ . Um valor  $p$  no teste Shapiro-Wilk menor que 5% indica rejeitar a hipótese nula que é a de que a distribuição é normal, o que não acontece com a distribuição do custo. Os dados do portal transparência federal não foram usados por não listar até 2014 médicos anestesistas como servidores. Dados do portal transparência dos estados não foram usados porque nenhum discrimina especialidade do médico como o portal transparência do Distrito Federal e também não fornecem a carga horária de cada profissional em forma de tabela exportável para o cálculo do valor médio da hora trabalhada. Essa variação de custo foi usada na análise de sensibilidade. Ao evitar um cancelamento, o benefício médio considerado foi o do estudo de 2007 que é muito próximo daquele calculado neste estudo,  $B_c = R\$29,54$ .

Para o custo da reserva de um leito de UTI devemos considerar duas situações. Na situação em que o leito foi planejado e realmente necessário o custo do leito não poderá ser considerado custo adicional portanto será nulo. Na situação em que o leito foi reservado mas não foi necessário há o custo de uma diária, que pela tabela nível II ou III do SUS é R\$800 (valor atualizado pela portaria 2.395 de 11 de outubro de 2011). Ao reservar um leito de UTI é gerada uma AIH (autorização de internação hospitalar) para que o leito seja bloqueado e garantido para a recuperação pós-operatória programada. Sem a geração da AIH o sistema regulador de leitos de UTI poderá encaminhar outros pacientes ao leito tornando as reservas inviáveis e a taxa de ocupação máxima ficará enviesada porque UTIs de apoio cirúrgico sempre parecerão estar abaixo de sua capacidade máxima. Por outro lado, ao gerar uma AIH é gerado um custo para o SUS de R\$800 que deverá cobrir todos os custos do hospital para uma diária de paciente em leito de UTI. Ao evitar uma reserva desnecessária  $B_d = R\$800$ .



O último custo a ser considerado é o da necessidade de leito de UTI não programada. De um ponto de vista determinista considera-se que houve falha na previsão da necessidade de reserva de leito de UTI e que a necessidade de UTI é inevitável portanto o custo da diária do leito de UTI não deverá ser considerado como adicional. Caso não houvesse o erro o paciente seria enviado para um leito de UTI da mesma forma contudo o valor do período de espera adicional até a liberação do leito não programado deve ser usado como custo. Devido à escassez do recurso e à necessidade de preparação de drogas para infusão contínua e configuração de ventiladores mecânicos há um atraso para o transporte do centro cirúrgico para a UTI. Outra causa de atraso no transporte é o tempo até a disponibilização do leito de UTI. Usando como referência os mesmos valores investigados no estudo brasileiro de 2007, considerando que o custo adicional durante o período de espera é o custo dos recursos humanos dos cuidadores que são médicos anesthesiologistas e que o custo de monitoramento e medicações (que são o custo direto da sala cirúrgica ocupada) é o mesmo que ocorreria na UTI, o valor de R\$225,75 por hora e uma média de 2h foi considerada como tempo médio de espera até a transferência para leito de UTI.<sup>73</sup> O custo do leito não programado na época é portanto R\$451,50. É interessante usar a mesma fonte de custos (mesma época e mesmo hospital) porque isso diminuirá o viés da proporção dos valores (razão entre custos das diferentes decisões). Usando os dados de AIH do DATASUS e do portal transparência estima-se que o intervalo de confiança de 95% deste custo possa variar de R\$120 a R\$800 com média de R\$460 e desvio-padrão de R\$340. Ao evitar necessidade de UTI não programada  $B_f = R\$451,50$ .

É comum não estarem disponíveis referências para custos de novas tecnologias médicas. Nessas situações devem ser determinados preços plausíveis e uma variabilidade que será considerada na análise de sensibilidade. Devido à ausência de banco de dados de preço dos modelos e do servidor, o preço médio de um servidor genérico e de aplicativos de apoio à decisão médica foram estimados com base em estudos norte americanos e no Banco de Preços em Saúde de São Paulo.<sup>75</sup>

O custo da adoção do sistema centralizado para o SUS inclui os custos fixos de implementação e os custos de servidor para centralizar os dados. Usando dados do banco de preços em saúde do estado de São Paulo, estes custos foram estimados em R\$600 por ano por médico em média, com desvio-padrão de R\$110 para o custo adicional de equipamentos físicos e sua manutenção e um custo anual único médio de R\$1750 com desvio-padrão de R\$201 para manutenção do sistema centralizado. O custo médio do sistema centralizado que será denominado  $C_c$  foi estimado em  $R\$ 1750 + 600 \times 8502 = R\$5.102.950,0$  com desvio-padrão de R\$110.

O custo de adoção dos sistemas descentralizados inclui o custo de dispositivos compatíveis e o custo do sistema descentralizado. Um custo idêntico por equipamento físico (e manutenção) foi estimado em (R\$600 por ano) e nenhum custo com servidor centralizado. O custo do sistema descentralizado que será denominado  $C_d$  foi estimado

em R\$  $600 \times 8502 = \text{R\$ } 5.101.200,0$  com desvio-padrão de R\$110. Para os custos dos modelos

A incidência de cancelamentos, indicação desnecessária de reserva de leito de UTI e de não indicação de reserva de leito de UTI quando necessário no SUS provavelmente é semelhante à internacional porque ainda não existem sistemas de apoio à decisão para esta finalidade. Apesar de não haver indicadores oficiais dessas incidências alguns poucos estudos brasileiros sugerem que essas incidências sejam semelhantes às internacionais.<sup>35,76-84</sup> Serão, portanto, consideradas como referência para o cálculo do custo do modelo atual de indicação de necessidade de reserva de leitos de UTI, ajustadas para uma prevalência de 33,3% de pacientes ASA I, II e III, incidências de cancelamentos de 5%, de reserva desnecessária de UTI de 20% e de ausência de indicação de UTI de 5%. Estas incidências são as menores entre todas as incidências nacionais e internacionais representando o caso do melhor cenário do modelo atual. Considerando o mesmo volume anual de 379.000 cirurgias o custo médio desse modelo, que será denominado  $C_p$  é R\$  $379.000 \times (0,05 \times 29,54 + 0,2 \times 800 + 0,05 \times 451,5) = \text{R\$}69.755.708$ .

Não foram aplicadas taxas de desconto nas simulações realizadas porque as coortes simuladas representam apenas a fração de um ano. A tabela 4 resume os custos estimados.

**Tabela 3 – Variáveis de custo e de benefício.**

Variável	Descrição
	Benefício ao evitar:
$B_c$	cancelamento de cirurgia
$B_d$	indicação desnecessária de UTI
$B_f$	não indicação de UTI necessária
	Custo do modelo:
$C_c$	Centralizado
$C_d$	Descentralizado
$C_p$	Atual

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

### 2.3.2 *Benefício líquido*

O benefício líquido foi calculado para os modelos de apoio à decisão e foi estimado como a diferença entre o custo dos erros de decisão decorrentes modelo atual e o custo decorrente dos erros de decisão dos modelos de apoio à decisão somados aos custos de implementação e manutenção do sistema. Quando esse benefício for negativo ele é chamado custo líquido. O benefício de um modelo será definido pelo custo evitado ao SUS. Ao evitar um cancelamento evita-se o gasto de R\$29,54 portanto há um benefício de R\$29,54 e pelo mesmo motivo há benefício de R\$800 ao evitar um agendamento desnecessário de UTI, benefício de R\$451,50 ao evitar o não agendamento de um leito de UTI necessário.

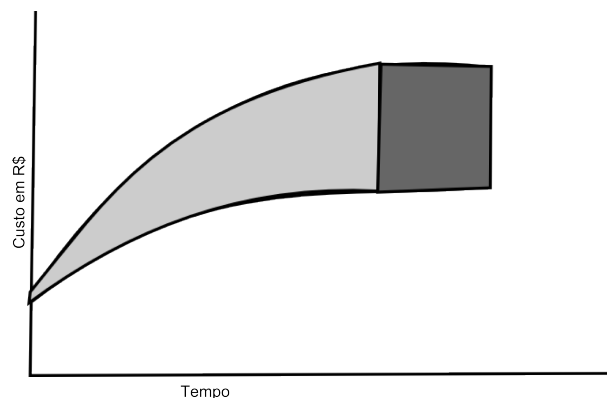
**Tabela 4 – Custos e benefícios estimados de acordo com a fonte de custo.**

Fonte do benefício/custo	Média	IC95%
$B_c$	R\$29,54	R\$15-45
$B_d$	R\$800	Sem variação
$B_f$	R\$451,50	R\$120-800
$C_c$	R\$5.102.950,0	R\$5102328 - 5103572
$C_d$	R\$5.101.200,0	R\$5100980 - 5101420
$C_p$	R\$69755708	Sem variação

$B_c, B_d$  e  $B_f$ : benefício ao evitar um cancelamento, indicação de UTI desnecessária e ausência de indicação de UTI necessária respectivamente.

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

Os modelos estudados apresentam sua menor acurácia no primeiro momento e uma tendência à melhora com o passar do tempo, por isso são chamados adaptativos. O benefício dos modelos adaptativos poderá variar em velocidades diferentes e ter mínimos diferentes. Por este motivo é importante considerar os benefícios decorrentes de erros adicionais no período de adaptação do modelo mais lento e não apenas a diferença entre o modelo mais preciso e o menos preciso após a estabilização do modelo. A figura 3 mostra os dois tipos de benefício: em cinza claro destaca-se a área que representa o benefício do modelo mais rápido sobre o modelo mais lento e a área de cor cinza escuro representa o benefício do melhor modelo após ambos estabilizarem sua acurácia.



**Figura 3 – Comparação entre dois modelos adaptativos de sistemas de decisão médica.**

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

Para comparar o benefício do modelo descentralizado com o do modelo centralizado é necessário quantificar cada tipo de erro evitado e multiplicar por seu respectivo benefício, por exemplo: se em 1000 avaliações forem evitadas 10 reservas de leito de UTI desnecessá-

rias, evitada a falha em reservar UTI necessária em 10 reservas e evitado o cancelamento de 10 cirurgias o benefício total será  $R\$(10 \times 29,54) + (10 \times 451,50) + (10 \times 800) = 12.810,4$ .

O número de erros evitados será a diferença entre o número de erros do modelo avaliado e o número de erros do modelo atual. Se o número de erros modelo atual for 20 agendamentos desnecessários, 20 falhas de agendamento necessário e 20 cancelamentos e o do modelo avaliado for 10 agendamentos desnecessários, 10 falhas de agendamento necessário e 10 cancelamentos o benefício do modelo avaliado será:  $R\$( (20 - 10) \times 29,54) + ((20 - 10) \times 451,50) + ((20 - 10) \times 800) = 12.810,4$ .

Considerando que para um modelo  $\theta$  em após  $\eta$  avaliações,  $C_{\eta,\theta}$  é o número de cancelamentos,  $F_{\eta,\theta}$  o número de falhas de agendamento de leito de UTI necessários e  $A_{\eta,\theta}$  o número de agendamentos desnecessários de leitos de UTI, o benefício total do modelo centralizado em relação ao descentralizado será:

$$\sum_{i=0}^{i=\eta} 29,54(C_{i,1} - C_{i,2}) + 451,5(F_{i,1} - F_{i,2}) + 800(A_{i,1} - A_{i,2}) \quad (2.10)$$

Uma taxa de desconto de 5% por ano, como sugerido internacionalmente para estudos de custo, foi aplicada aos benefícios por eles terem sido estimados para o ano de 2007.

### 2.3.3 *Caso base*

Em análises de avaliação de tecnologias o caso base é usado para estimar os custos e benefícios supondo que os parâmetros do modelo estejam corretos. Considerando dados do DATASUS no universo de cirurgias realizadas no SUS no ano de 2011 (dados a partir de 2012 ainda não estão disponíveis na época deste estudo), a prevalência de pacientes ASA I, II e III é respectivamente 30%, 34% e 35%. De acordo com os poucos estudos nacionais e com os principais estudos internacionais, a probabilidade de necessidade de UTI no pós-operatório de pacientes ASA I, II e III é respectivamente 10%, 15% e 40%.<sup>30,32,84,85</sup> Esses mesmos parâmetros de prevalência e probabilidade de necessidade de UTI no pós-operatório foram usados nas coortes simuladas. A tabela ?? resume os parâmetros do caso base.

### 2.3.4 *Análise de sensibilidade*

As incertezas de estimativas acerca dos parâmetros de uma avaliação econômica estão sempre presentes. Estas devem ser abordadas sistematicamente na busca pelo esclarecimento do impacto das incertezas sobre a análise.<sup>63,86</sup>

Várias são as fontes de incerteza: podem não existir dados disponíveis ou não serem conhecidos, sendo necessário adotar suposições a cerca dos custos. Este tipo de situação é frequente nas estimativas de novas tecnologias médicas ainda não aprovadas. A questão da incerteza é derivada da carência de informação, seja no campo dos custos ou na natureza clínica.<sup>68</sup>

**Tabela 5 – Parâmetros do caso base.**

Parâmetro	Valor
Número de médicos	1 a 50
Número de avaliações por época	45
P(ASA I)	33%
P(ASAI)	33%
P(ASA III)	33%
P(UTI   ASAI)	10%
P(UTI   ASAI)	15%
P(UTI   ASAI)	40%
$B_c$	R\$29,54
$B_f$	R\$451,5
$B_d$	R\$800
$C_c$	R\$5.102.950,0
$C_d$	R\$5.101.200,0
$C_p$	R\$69.755.708

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

A análise de sensibilidade é definida como uma técnica de avaliação da incerteza utilizada para comprovar o grau de estabilidade dos resultados da análise e até que ponto esse grau é mantido quando valores de variáveis (parâmetros) principais são modificados.<sup>68</sup> Esta técnica de controle e dimensionamento da incerteza nos estudos econômicos deve ser obrigatoriamente empregada na avaliação de robustez dos resultados.<sup>68</sup>

As principais etapas da análise de sensibilidade são: identificar para quais parâmetros incertos ela é necessária, especificar faixa plausível de variação sobre a qual se acredita que variem os fatores de incerteza e calcular os resultados do estudo com base na combinação da melhor suposição, a estimativa mais conservadora e a menos conservadora.<sup>68</sup>

Nesse estudo os parâmetros incertos são os custos de cada tipo de erro: custo de implementação e custo de manutenção do sistema de apoio à decisão, falha em indicar reserva que foi necessária, cancelamento de cirurgia e indicação desnecessária de reserva de UTI. Sabendo que em todos os custos calculados a distribuição é normal a variação descrita na tabela 4 foi usada na análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade pode ser parcial, de um único parâmetro por vez.<sup>44</sup> Para isso esse parâmetro é variado isoladamente mantendo todos os outros constantes dentro dos valores esperados. Esse processo é repetido para cada um dos parâmetros incertos.<sup>44</sup>

A análise de situações extremas é realizada variando todos os parâmetros simultaneamente mas para os extremos de incerteza mais pessimista num momento e mais otimista no outro para a nova tecnologia avaliada, chamados de pior cenário e melhor cenário.<sup>44</sup> Quando uma nova tecnologia parece boa mesmo no pior cenário a evidência de

decidir por ela torna-se muito favorável. Da mesma forma, se o benefício em um melhor cenário for questionável decidir pela nova tecnologia pode ser arriscado.<sup>68</sup>

A análise de sensibilidade múltipla de tecnologias de saúde é realizada variando todos os parâmetros simultaneamente e a técnica de simulações de Monte Carlo é a mais usada desde 1984.<sup>86</sup> É considerada a melhor forma de análise de sensibilidade quando não é possível definir com segurança os parâmetros de pior ou melhor cenário. Esta situação ocorre quando existem múltiplos desfechos com custos diferentes, como neste estudo: há 3 desfechos diferentes e 3 fontes de custos diferentes.

### 3 RESULTADOS

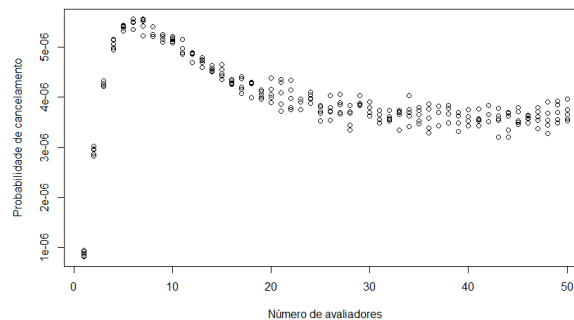
#### 3.1 Indicadores técnicos

Apesar do esperado ser o menor custo do sistema centralizado por sua potencial maior acurácia, isso não ocorreu nas simulações. A probabilidade de errar com consequentes cancelamentos ou de não indicar reserva de UTI quando necessário foi menor no modelo centralizado contudo a probabilidade de não indicar reserva de UTI quando não necessário foi maior no modelo descentralizado, como mostram a tabela 6 e as figuras 4,5 e 6.

**Tabela 6 – Incidência de erros de avaliação.**

Fonte de custo	Modelo		
	Atual	Descentralizado	Centralizado
Cancelamento	5%	4,8%	2%
Indicação desnecessária	20%	7%	74%
Não indicar UTI necessária	5%	18%	0.001%
Erros	30%	29,8%	76%

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.



**Figura 4 – Probabilidade de cancelamentos em função do número de avaliadores.**

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

A figura 7 mostra para cada época, ou seja, para cada 45 pacientes avaliados sequencialmente, qual o benefício da escolha do modelo descentralizado com 50 médicos enquanto a figura 8 compara as dimensões de custo de cada grupo.

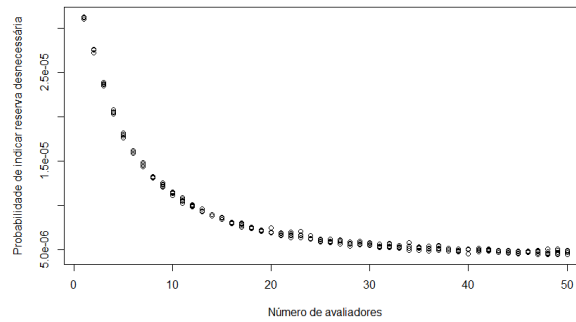


Figura 5 – Probabilidade de reservas desnecessárias em função do número de avaliadores.

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

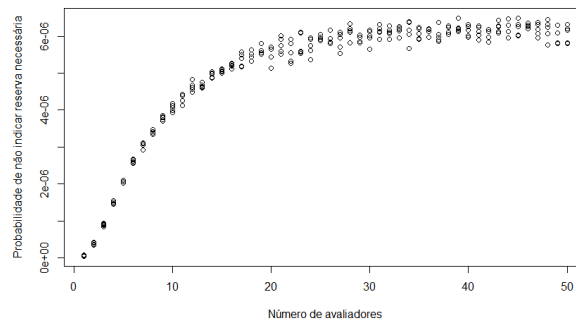


Figura 6 – Probabilidade de reservas necessárias e não realizadas em função do número de avaliadores.

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

Tabela 7 – Comparação do custo dos desfechos entre os modelos estáveis por ano.

Fonte de custo	Modelo		
	Atual	Descentralizado	Centralizado
Cancelamento	R\$559.783	R\$592.767,4	R\$223.913,2
Indicação desnecessária	R\$60.640.000	R\$22.133.600	R\$227.400.000
Não indicar UTI necessária	R\$8.555.925	R\$31.485.804	R\$145.450,7
Total	R\$69.755.708	R\$54.212.171	R\$227.769.364

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.



**Tabela 8 – Análise de sensibilidade do benefício líquido de cada modelo estável.**

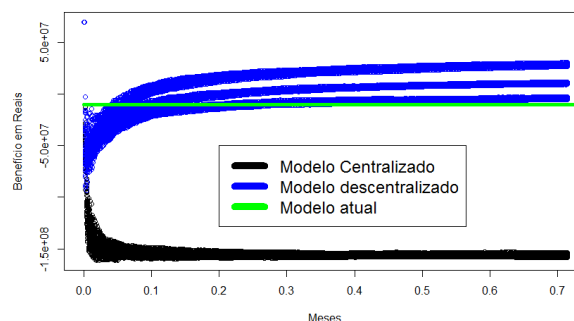
Modelo	Desfecho	Mediana(IC95%) (R\$)
Centralizado	Benefício líquido	-147.880.922 (-187.305.162 a -121.392.118)
	$B_c$	316.728,7 (65.435,17 a 559.783)
	$B_d$	-156.873.043 (-196.420.870 a -130.507.826)
	$B_f$	7.555.925 (4.840.077 a 8.555.925)
Descentralizado	Benefício líquido	23.163.425 (1.618 a 45.540.904)
	$B_c$	73.674,3 (-923.260,5 a 559.783)
	$B_d$	34.274.783 (21.092.174 a 54.048.696)
	$B_f$	-156.226.684 (-450.574.510 a 16.161.466)

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

**Tabela 9 – Análise de sensibilidade do benefício líquido de cada modelo nos 10 primeiros anos.**

Modelo	Desfecho	Mediana(IC95%) (R\$)
Centralizado	Benefício líquido	-156.655.439 (-158.193.008 a -154.700.136)
	$B_c$	500.409 (559.783 a 147.714,6)
	$B_d$	-51.276.253 (-166.933.490 a 60.640.000)
	$B_f$	8.534.702 (8.124.979 a 8.555.925)
Descentralizado	Benefício líquido	10.292.612 (2.618 a 30.387.462)
	$B_c$	327.592,7 (-993.176,3 a 559.783)
	$B_d$	45.103.375 (25.824.418 a 60.640.000)
	$B_f$	5.345.180 (-31.853.070 a 8.555.925)

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.



**Figura 7 – Análise múltipla de sensibilidade do benefício esperado em R\$ dos modelos estudados em função do tempo.**

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

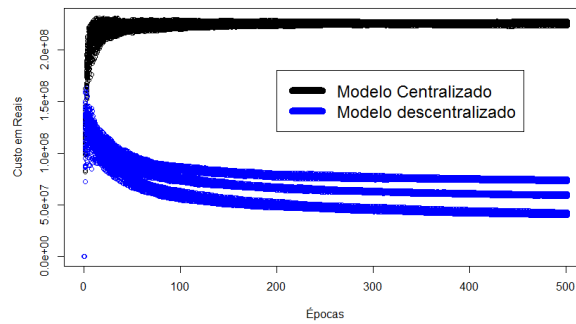


Figura 8 – Análise múltipla de sensibilidade do custo esperado em R\$ dos modelos estudados em função do tempo.

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

Tabela 10 – Análise de sensibilidade de incidência de erros de avaliação.

Fonte de custo	Modelo	
	Descentralizado	Centralizado
Cancelamento	3,5-6,1%	2%
Indicação desnecessária	7%	74%
Não indicar UTI necessária	18%	0.001%
Erros	29,8%	76%

Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.

### 3.2 Análise de sensibilidade

### 3.3 Razão custo-efetividade e benefício líquido do melhor modelo

Na análise econômica de novas tecnologias a razão de custo-efetividade é definida como a razão entre o custo total da nova tecnologia e a efetividade medida em suas unidades. Neste estudo os três parâmetros de efetividade são número de cancelamentos cirúrgicos evitados, número de indicações de UTI desnecessárias evitadas e número de indicações de UTI necessárias e não indicadas. Como vemos na tabela 7 o custo anual da nova tecnologia proposta para o SUS (modelo descentralizado) é R\$59.700.118 para evitar 758 cancelamentos e 49.270 indicações de UTI desnecessárias. Há contudo aumento anual de 49.270 casos de UTI necessária não indicada, sendo a razão custo-efetividade negativa para este desfecho.

O benefício líquido nos estudos custo-benefício para avaliações de novas tecnologias na saúde é definido como a diferença entre o custo total da nova tecnologia e o benefício monetário total da tecnologia. Este valor por ano para o SUS é R\$10.292.612 ou R\$26,53 por cirurgia.

**Tabela 11 – Comparação do custo dos desfechos entre os modelos considerando fase de adaptação após 10 anos.**

Fonte de custo	Modelo		
	Atual	Descentralizado	Centralizado
Cancelamento	R\$559.783	R\$ 1.007.609	R\$223.913,2
Indicação desnecessária	R\$60.640.000	R\$34.564.800	R\$224.368.000
Não indicar UTI necessária	R\$8.555.925	R\$24.127.709	R\$171.118,5
Total	R\$69.755.708	R\$59.700.118	R\$224.763.032

**Fonte: Gabriel Magalhães Nunes Guimarães, 2014.**

## 4 CONCLUSÕES

O modelo de auxílio a decisões acopladas de médicos sobre a reserva de leito de UTI em pós-operatório foi identificado como sistema complexo e por isso a modelagem para comparação entre um sistema centralizado e um descentralizado foi realizada com a aplicação de técnica de modelagem multiagentes. O modelo descentralizado além de ser teoricamente mais atrativo para o profissional médico é também o que gera maior benefício da perspectiva do SUS. O modelo descentralizado não depende de um sistema online centralizador portanto tem vantagens potenciais em aplicações locais e também tem custo de implementação e manutenção menores.

Há um potencial benefício anual de R\$10.292.612 (IC95% R\$2.618 a R\$30.387.462) ou em média R\$26,53 por cirurgia na adoção de um sistema descentralizado para apoio à decisão sobre reserva de leitos de UTI no período pós-operatório na perspectiva do SUS.

## 5 DISCUSSÃO

O grande potencial da implementação de modelos baseados em agentes em diversas situações esbarra no custo de serem necessariamente mais complexos em termos estruturais que os modelos analíticos. Eles devem ser implementados e executados em computadores, que incluem dispositivos portáteis como celulares. Esses modelos são mais difíceis de serem analisados, entendidos e descritos que os analíticos. A publicação desses modelos é um problema particular tratado por alguns autores.<sup>87</sup>

A publicação de modelos analíticos é fácil porque são formulados em linguagem matemática formal. Sua descrição costuma ser completa, sem ambiguidades e acessível aos leitores versados em métodos quantitativos básicos. As publicações de modelos baseados em agentes costumam ser mais difíceis de ler, incompletas, ambíguas e portanto menos acessíveis. Consequentemente os resultados obtidos por modelos baseados em agentes têm baixa reproduzibilidade.<sup>87</sup>

Recentemente foi publicado um guia de como descrever um modelo baseado em agentes.<sup>87</sup> Esse guia sugere a descrição de fluxogramas (como o da figura 2) e tabelas (como a tabela 1) assim como uma descrição detalhada dos pressupostos dos modelos.<sup>87</sup> Há muitos requisitos em comum com os guias para publicação de estudos de avaliações econômicas e esses foram descritos nos métodos e nos resultados.<sup>44,87</sup>

O modelo centralizado, apesar de usar os dados de todos os pacientes para uma única distribuição *a priori*, apresentou menor proporção de acertos que o observado no melhor cenário do modelo atual. O modelo descentralizado, por outro lado, apresentou proporção de acertos próxima à do melhor cenário do modelo atual contudo com a menor proporção de indicações desnecessárias de reserva de UTI apesar de aumentar o número de erros por não indicar reserva de UTI quando necessário.

Para entender a melhor adaptação do modelo descentralizado é necessário avaliar os modelos em cada etapa. No início, todos os agentes em ambos os modelos apresentam a mesma distribuição *a priori* que é uma distribuição uniforme entre zero e um. Supõe-se que após muitas exposições aos erros cometidos todos os agentes apresentem tendência de atualização de crenças para a mesma do modelo centralizado. Na simulação esse equilíbrio estático não ocorre. No início a diversidade de crenças aumenta no modelo descentralizado e estabiliza em um equilíbrio dinâmico: nenhum agente mantém a mesma crença por muito tempo mas a diversidade das crenças se mantém estável. Essa diversidade provavelmente ocorre devido à complexidade da interação entre os agentes nesse sistema e é um fenômeno emergente porque não há controle central, apenas regras simples de interação. Esse tipo de equilíbrio dinâmico, caracterizado por flutuações no nível individual e por estabilidade no nível coletivo, é definido por alguns autores como robustez e é uma característica típica

de sistemas complexos.<sup>36,88-92</sup> A forma como o fenômeno emergiu, sem controle central e de difícil compreensão é também característica típica de um sistema complexo.<sup>36,88-92</sup>

Há importantes implicações desses primeiros resultados: na medicina muitos autores inferiram a partir de preceitos da saúde baseada em evidências que, como a melhor evidência para determinada conduta é única, é recomendável aos profissionais de saúde seguir condutas protocolares.<sup>93,94</sup> Muitos protocolos de condutas padronizadas são elaborados e publicados anualmente. Por outro lado, há anos alguns autores já alertam que o uso de protocolos de condutas padronizadas pouco específicos podem trazer mais dano que benefício.<sup>95-97</sup> Esses primeiros resultados sugerem pela primeira vez que um conjunto de protocolos diferentes, adaptativos, aplicando um conhecimento baseado em evidências individuais e compartilhadas (modelo descentralizado) pode ser superior à aplicação em massa de uma única evidência aglomerada (modelo centralizado). Se considerarmos que no ambiente de cada médico há diferenças locais como recursos medicamentosos disponíveis e experiência dos cirurgiões o potencial ganho de precisão do modelo descentralizado pode ser ainda maior.

O resultado mais importante desta pesquisa é que sistemas descentralizados de apoio à decisão sobre reserva de leito de UTI baseados em estatística bayesiana apresentam benefício na perspectiva do SUS mesmo quando comparados ao melhor cenário do modelo atual. Apesar da carência de estudos para determinar com maior precisão determinados parâmetros como indicadores nacionais de probabilidade de indicação errada de reserva de leito de UTI dada a classificação de risco do paciente, no momento atual este estudo é a melhor evidência disponível para a decisão de adotar tais sistemas de apoio à decisão. De acordo com o SIOPS foram gastos R\$53.840.284,00 com tecnologia da informação no SUS em 2011. Isso significa que o benefício total do modelo é cerca de 20% dos gastos atuais com tecnologia da informação do SUS apesar de seu custo de implementação e manutenção ser estimado em R\$5.101.200,0. Não é possível estimar com os dados disponíveis para este estudo o benefício esperado em uma implementação parcial do sistema.

Considerando o período de adaptação dos modelos, apenas o modelo descentralizado ultrapassa os benefícios da referência do melhor cenário do modelo atual (como mostra a figura 7). A linha verde representa o valor estático do melhor cenário do modelo atual e em frações de meses o modelo descentralizado passa a ter benefício superior em todas as combinações da análise múltipla de sensibilidade.

Outras implicações do uso de sistemas de apoio à decisão devem ser consideradas: a disponibilidade do sistema não significa aderência dos médicos ao sistema porque a melhor decisão para o SUS pode não ser a melhor decisão na perspectiva do médico caso sua prioridade seja evitar processos legais de erro médico. Apesar de ser caro um erro por indicação desnecessária de necessidade de reserva de UTI no pós-operatório na perspectiva do médico não implica em custo adicional e gera um aumento discreto no risco de erro médico do tipo imprudência: aceitar decisão de risco que gerou dano a um paciente. Medidas de proteção legal aos usuários do sistema também devem ser aplicadas ou todo o investimento pode ser inefetivo.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> Brasil. Lei 8080 de 19 de setembro de 1990. Diário Oficial da União - Brasília (DF). 1990;.
- <sup>2</sup> Brasil. Constituição 1988. Constituição da República Federativa do Brasil. 1988;Artigos:196–200.
- <sup>3</sup> Pinheiro Filho FP, Sarti FM. Falhas de mercado e redes em políticas públicas: desafios e possibilidades ao Sistema Único de Saúde Market and public policy network failures: challenges and possibilities for the Brazilian Unified Health System. *Ciênc saúde coletiva*. 2012;17(11):2981–2990.
- <sup>4</sup> Group EBMW, et al. Evidence-based medicine. A new approach to teaching the practice of medicine. *JAMA: the journal of the American Medical Association*. 1992;268(17):2420.
- <sup>5</sup> Guyatt G, Cairns J, Churchill D, Cook D, Haynes B, Hirsh J, et al. Evidence-based medicine: a new approach to teaching the practice of medicine. *Jama*. 1992;268(17):2420–2425.
- <sup>6</sup> Montori VM, Guyatt GH. Progress in evidence-based medicine. *Jama*. 2008;300(15):1814–1816.
- <sup>7</sup> Elstein A. On the origins and development of evidence-based medicine and medical decision making. *Inflammation research*. 2004;53(2):S184–S189.
- <sup>8</sup> Fenton NE, Neil M. Decision Support Software for Probabilistic Risk Assessment Using Bayesian Networks. *IEEE software*. 2014;31(2):21–26.
- <sup>9</sup> Ashby D, Smith AF. Evidence-based medicine as Bayesian decision-making. *Statistics in medicine*. 2000;19(23):3291–3305.
- <sup>10</sup> Ferraz M. Economia da saúde e Medicina. *Sinop Reumatol*. 2005;4:98–102.
- <sup>11</sup> Zweifel P, Breyer F, Kifmann M. *Health economics*. Springer; 2009.
- <sup>12</sup> Moraes E, Campos GM, Figlie NB, Laranjeira RR, Ferraz MB. Conceitos introdutórios de economia da saúde eo impacto social do abuso de álcool Introductory concepts of health economics and the social impact of the alcohol misuse. *Rev Bras Psiquiatr*. 2006;28(4):321–5.
- <sup>13</sup> Vretveit J. *Evaluating health interventions: An introduction to evaluation of health treatments, services, policies, and organizational interventions*. McGraw-Hill International; 1998.
- <sup>14</sup> Dolinski SY. Decision Making in Anesthesiology. *Anesthesia & Analgesia*. 2008;107(1):350–351.
- <sup>15</sup> Papadakos PJ. Decision Making in Anesthesiology . *Critical Care Medicine*. 1994;22(3):535.
- <sup>16</sup> Gaba DM. Dynamic decision-making in anesthesiology: Cognitive models and training approaches. In: *Advanced models of cognition for medical training and practice*. Springer; 1992. p. 123–147.
- <sup>17</sup> Bready LL, Dillman D, Noorily SH. *Decision making in anesthesiology: an algorithmic approach*. Elsevier Health Sciences; 2007.
- <sup>18</sup> Stiegler MP, Tung A. Cognitive Processes in Anesthesiology Decision Making. *Anesthesiology*. 2014;120(1):204–217.
- <sup>19</sup> Stahl JE. Modelling methods for pharmacoeconomics and health technology assessment. *Pharmacoeconomics*. 2008;26(2):131–148.

- <sup>20</sup> Garg AX, Adhikari NK, McDonald H, Rosas-Arellano MP, Devereaux P, Beyene J, et al. Effects of computerized clinical decision support systems on practitioner performance and patient outcomes: a systematic review. *Jama*. 2005;293(10):1223–1238.
- <sup>21</sup> Kawamoto K, Houlihan CA, Balas EA, Lobach DF. Improving clinical practice using clinical decision support systems: a systematic review of trials to identify features critical to success. *Bmj*. 2005;330(7494):765.
- <sup>22</sup> Romano MJ, Stafford RS. Electronic health records and clinical decision support systems: impact on national ambulatory care quality. *Archives of internal medicine*. 2011;171(10):897–903.
- <sup>23</sup> Musen MA, Middleton B, Greenes RA. Clinical decision-support systems. In: *Biomedical informatics*. Springer; 2014. p. 643–674.
- <sup>24</sup> Lin CS, Chang CC, Chiu JS, Lee YW, Lin JA, Mok MS, et al. Application of an artificial neural network to predict postinduction hypotension during general anesthesia. *Medical Decision Making*. 2011;31(2):308–314.
- <sup>25</sup> Fisher RA. *Statistical methods for research workers*. Genesis Publishing Pvt Ltd; 1925.
- <sup>26</sup> Neyman J, Pearson ES. *On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses*. Springer; 1992.
- <sup>27</sup> Hubbard R, Bayarri MJ. Confusion over measures of evidence ( $p$ 's) versus errors ( $\alpha$ 's) in classical statistical testing. *The American Statistician*. 2003;57(3):171–178.
- <sup>28</sup> Wagenmakers EJ, Lee M, Lodewyckx T, Iverson GJ. Bayesian versus frequentist inference. In: *Bayesian evaluation of informative hypotheses*. Springer; 2008. p. 181–207.
- <sup>29</sup> Press SJ. *Applied multivariate analysis: using Bayesian and frequentist methods of inference*. Courier Dover Publications; 2012.
- <sup>30</sup> Sobol JB, Wunsch H. Triage of high-risk surgical patients for intensive care. *Crit Care*. 2011;15(2):217.
- <sup>31</sup> Goldhill D. Preventing surgical deaths: critical care and intensive care outreach services in the postoperative period. *British journal of anaesthesia*. 2005;95(1):88–94.
- <sup>32</sup> Wanderer JP, Anderson-Dam J, Levine W, Bittner EA. Development and validation of an intraoperative predictive model for unplanned postoperative intensive care. *Anesthesiology*. 2013;119(3):516–524.
- <sup>33</sup> Conselho Federal de Medicina C. Resolução número 1802/2006: dispõe sobre a prática do ato anestésico. *Diário Oficial*. 2006;1:102.
- <sup>34</sup> Secretaria de Atenção à Saúde do Ministério da Saúde SM. Relatório anual de gestão referente ao período de setembro de 2011 a maio de 2013. 2014; Available from: <http://portalsaude.saude.gov.br/images/pdf/2014/abril/01/relatorio-de-gestao-sas-2013.pdf>.
- <sup>35</sup> Murias G, Sales B, Blanch L. Context Information in Critical Care. In: *Annual Update in Intensive Care and Emergency Medicine 2011*. Springer; 2011. p. 781–789.
- <sup>36</sup> Ladyman J, Lambert J, Wiesner K. What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*. 2013;3(1):33–67.
- <sup>37</sup> Roy M, Zinck RD, Bouma MJ, Pascual M. Epidemic cholera spreads like wildfire. *Scientific reports*. 2014;4.
- <sup>38</sup> Lorenz EN. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the atmospheric sciences*. 1963;20(2):130–141.
- <sup>39</sup> Poincare H. *New Methods of Celestial Mechanics*. American Institute of Physics; 1892-99.
- <sup>40</sup> Schuster HG, Just W. *Deterministic chaos: an introduction*. John Wiley & Sons; 2006.
- <sup>41</sup> Bak P. *How nature works: the science of self-organized criticality*. *Nature*. 1996;383(6603):772–773.



- <sup>42</sup> Langton CG. Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1990;42(1):12–37.
- <sup>43</sup> Farber DA. Probabilities Behaving Badly: Complexity Theory and Environmental Uncertainty. *UC Davis L Rev*. 2003;37:145.
- <sup>44</sup> Kim SY, Goldie SJ. Cost-effectiveness analyses of vaccination programmes. *Pharmacoeconomics*. 2008;26(3):191–215.
- <sup>45</sup> Ulahannan T. Decision Making in Health and Medicine: Integrating Evidence and Values. *Journal of the Royal Society of Medicine*. 2002;95(2):108–109.
- <sup>46</sup> Siebers PO, Macal CM, Garnett J, Buxton D, Pidd M. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*. 2010;4(3):204–210.
- <sup>47</sup> Tesfatsion L. Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial life*. 2002;8(1):55–82.
- <sup>48</sup> Huang J, Jennings NR, Fox J. Agent-based approach to health care management. *Applied Artificial Intelligence an International Journal*. 1995;9(4):401–420.
- <sup>49</sup> Nealon J, Moreno A. Agent-based applications in health care. In: *Applications of software agent technology in the health care domain*. Springer; 2003. p. 3–18.
- <sup>50</sup> Sichman JS, Conte R, Gilbert N. *Multi-agent systems and agent-based simulation*. Springer; 1998.
- <sup>51</sup> Macal CM, North MJ. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*. Winter Simulation Conference; 2005. p. 2–15.
- <sup>52</sup> Drogoul A, Vanbergue D, Meurisse T. Multi-agent based simulation: Where are the agents? In: *Multi-agent-based simulation II*. Springer; 2003. p. 1–15.
- <sup>53</sup> Railsback SF, Lytinen SL, Jackson SK. Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation*. 2006;82(9):609–623.
- <sup>54</sup> Dickerson M. NetLogo and multi-agent simulation (in introductory computer science). *Journal of Computing Sciences in Colleges*. 2014;29(6):90–92.
- <sup>55</sup> R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria; 2014. Available from: <http://www.R-project.org>.
- <sup>56</sup> Conselho Federal de Medicina C. Portal da saúde do CFM: aplicativo de busca por médicos. 2014; Available from: [http://portal.cfm.org.br/index.php?option=com\\_medicos&Itemid=59](http://portal.cfm.org.br/index.php?option=com_medicos&Itemid=59).
- <sup>57</sup> Briggs AH. A Bayesian approach to stochastic cost-effectiveness analysis. *Health Economics*. 1999;8(3):257–261.
- <sup>58</sup> Strachan RW, Dijk HK. Bayesian Model Selection with an Uninformative Prior\*. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. 2003;65(s1):863–876.
- <sup>59</sup> Diamond GA, Kaul S. Prior convictions: Bayesian approaches to the analysis and interpretation of clinical megatrials. *Journal of the American College of Cardiology*. 2004;43(11):1929–1939.
- <sup>60</sup> Van Dongen S. Prior specification in Bayesian statistics: three cautionary tales. *Journal of Theoretical Biology*. 2006;242(1):90–100.
- <sup>61</sup> Madruga MR, Pereira CdB, Stern JM. Bayesian evidence test for precise hypotheses. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2003;117(2):185–198.
- <sup>62</sup> Yang J. Convergence and uncertainty analyses in Monte-Carlo based sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*. 2011;26(4):444–457.
- <sup>63</sup> Briggs A, Sculpher M, Buxton M. Uncertainty in the economic evaluation of health care technologies: the role of sensitivity analysis. *Health economics*. 1994;3(2):95–104.
- <sup>64</sup> Siegel JE, Weinstein MC, Russell LB, Gold MR. Recommendations for reporting cost-effectiveness analyses. *Jama*. 1996;276(16):1339–1341.

- <sup>65</sup> George B, Harris A, Mitchell A. Cost-effectiveness analysis and the consistency of decision making. *Pharmacoeconomics*. 2001;19(11):1103–1109.
- <sup>66</sup> Philips Z, Ginnelly L, Sculpher M, Claxton K, Golder S, Riemsma R, et al. Review of guidelines for good practice in decision-analytic modelling in health technology assessment. 2004;.
- <sup>67</sup> Flegal JM, Gong L. Relative fixed-width stopping rules for Markov chain Monte Carlo simulations. arXiv preprint arXiv:13030238. 2013;.
- <sup>68</sup> Nita ME, Secoli SR, Nobre MRC, Ono-Nita SK, Campino ACC, Santi FM, et al. Avaliação de tecnologias em saúde: evidência clínica, análise econômica e análise de decisão. *Artmed*; 2010.
- <sup>69</sup> Jones GL, Haran M, Caffo BS, Neath R. Fixed-width output analysis for Markov chain Monte Carlo. *Journal of the American Statistical Association*. 2006;101(476):1537–1547.
- <sup>70</sup> Steiger NM, Lada EK, Wilson JR, Joines JA, Alexopoulos C, Goldsman D. ASAP3: A batch means procedure for steady-state simulation analysis. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2005;15(1):39–73.
- <sup>71</sup> Sherman M. On batch means in the simulation and statistics communities. In: *Proceedings of the 27th conference on Winter simulation*. IEEE Computer Society; 1995. p. 297–302.
- <sup>72</sup> Alexopoulos C, Seila AF. Implementing the batch means method in simulation experiments. In: *Proceedings of the 28th conference on Winter simulation*. IEEE Computer Society; 1996. p. 214–221.
- <sup>73</sup> Perroca MG, de Carvalho Jericó M, Facundin SD. Cancelamento cirúrgico em um hospital escola: implicações sobre o gerenciamento de custos. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*. 2007;15(5):1018–1024.
- <sup>74</sup> Macedo JM, Kano JA, Braga EM, Garcia MA, Caldeira SM. Cancelamento de cirurgias em um hospital universitário: causas e tempo de espera para novo procedimento. *Rev SOBECC*. 2013;18(1):26–34.
- <sup>75</sup> Hillestad R, Bigelow J, Bower A, Girosi F, Meili R, Scoville R, et al. Can electronic medical record systems transform health care? Potential health benefits, savings, and costs. *Health Affairs*. 2005;24(5):1103–1117.
- <sup>76</sup> Azari-Rad S, Yontef AL, Aleman DM, Urbach DR. Reducing elective general surgery cancellations at a Canadian hospital. *Can J Surg*. 2013 Apr;56(2):113–118. Available from: <http://dx.doi.org/10.1503/cjjs.018411>.
- <sup>77</sup> Baugh R, Li Y. The impact of scheduling policies on surgical clinical access. *J Med Pract Manage*. 2012;27(6):371–377.
- <sup>78</sup> Dahl D, Wojtal GG, Breslow MJ, Holl R, Huguez D, Stone D, et al. The high cost of low-acuity ICU outliers. *J Healthc Manag*. 2012;57(6):421–33; discussion 434.
- <sup>79</sup> Kolker A. Process modeling of ICU patient flow: effect of daily load leveling of elective surgeries on ICU diversion. *J Med Syst*. 2009 Feb;33(1):27–40.
- <sup>80</sup> Reyna VF, Hamilton AJ. The importance of memory in informed consent for surgical risk. *Med Decis Making*. 2001;21(2):152–155.
- <sup>81</sup> Robert R, Reignier J, Tournoux-Facon C, Boulain T, Lesieur O, Gissot V, et al. Refusal of intensive care unit admission due to a full unit: impact on mortality. *Am J Respir Crit Care Med*. 2012 May;185(10):1081–1087. Available from: <http://dx.doi.org/10.1164/rccm.201104-07290C>.
- <sup>82</sup> Vissers JM. Patient flow based allocation of hospital resources. *IMA J Math Appl Med Biol*. 1995;12(3-4):259–274.
- <sup>83</sup> Zimmerman JE, Kramer AA. A model for identifying patients who may not need intensive care unit admission. *J Crit Care*. 2010 Jun;25(2):205–213. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrrc.2009.06.010>.

- <sup>84</sup> Kronemberger TB, Auler Jr JOC. Modelo para predição de morbi-mortalidade e de necessidade de UTI pós-operatória em pacientes cirúrgicos oncológicos. *Revista de Medicina*. 2013;92(1):43–51.
- <sup>85</sup> Neto LJ, Thomson JC, Cardoso JR. Complicações respiratórias no pós-operatório de cirurgias eletivas e de urgência e emergência em um Hospital Universitário. *J Bras Pneumol*. 2005;31(1):41–7.
- <sup>86</sup> Doubilet P, Begg CB, Weinstein MC, Braun P, McNeil BJ. Probabilistic sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. A practical approach. *Medical decision making: an international journal of the Society for Medical Decision Making*. 1984;5(2):157–177.
- <sup>87</sup> Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, et al. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological modelling*. 2006;198(1):115–126.
- <sup>88</sup> Boccaro N, Boccaro N. *Modeling complex systems*. vol. 1. Springer; 2004.
- <sup>89</sup> Siljak DD. *Decentralized control of complex systems*. Courier Dover Publications; 2011.
- <sup>90</sup> Highsmith J. *Adaptive software development: a collaborative approach to managing complex systems*. Addison-Wesley; 2013.
- <sup>91</sup> Nicolis G, Nicolis C. *Foundations of Complex Systems: Emergence, Information and Prediction*. World Scientific; 2012.
- <sup>92</sup> Macal CM, North MJ. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*. 2010;4(3):151–162.
- <sup>93</sup> Shekelle PG, Woolf SH, Eccles M, Grimshaw J. Clinical guidelines: developing guidelines. *BMJ: British Medical Journal*. 1999;318(7183):593.
- <sup>94</sup> Ganiats TG, Kempster JA. Rationing on the fly: the opportunity cost of clinical guidelines. *The Journal of the American Board of Family Medicine*. 2014;27(4):439–441.
- <sup>95</sup> Woolf SH, Grol R, Hutchinson A, Eccles M, Grimshaw J. Potential benefits, limitations, and harms of clinical guidelines. *Bmj*. 1999;318(7182):527–530.
- <sup>96</sup> Shekelle PG, Kravitz RL, Beart J, Marger M, Wang M, Lee M. Are nonspecific practice guidelines potentially harmful? A randomized comparison of the effect of nonspecific versus specific guidelines on physician decision making. *Health services research*. 2000;34(7):1429.
- <sup>97</sup> Guallar E, Laine C. Controversy over clinical guidelines: Listen to the evidence, not the noise. *Annals of internal medicine*. 2014;160(5):361–362.

## ANEXO A – ANEXO

### Código netlogo

---

```
globals [soma cancelamentos1 faltas1 desnecessario1 cancelamentos2 faltas2
         desnecessario2 custo1 custo2 tpacientes]
```

```
breed [agents agent]
breed [anestesisistas anestesisista]
breed [pacientes paciente]
```

```
anestesisistas-own [priorASA1 priorASA2 priorASA3]
pacientes-own [ASA reserva? aval? uti?]
```

```
to setup
  clear-all
  reset-ticks
  set cancelamentos1 0
  set faltas1 0
  set desnecessario1 0
  set tpacientes 0
  create-anestesisistas medicos [
    set priorASA1 []
    set priorASA2 []
    set priorASA3 []
    let i 0
    let k 1 / 101
    while [i < 101][
      set priorASA1 fput k priorASA1
      set priorASA2 fput k priorASA2
      set priorASA3 fput k priorASA3
      set i i + 1
    ]
  ]
  novospacientes
end
```

```
to go
  avalfinal
  avalinicial
  novospacientes
  normalizar
  tick
end
```

```

to go1000
  let i 0
  while [i < (500)][
    go
    set i i + 1
    if(ticks > (500))[stop]
  ]
end
\newpage
to avalfinal
  ask pacientes with [aval? = true][

    let ASAi ASA
  let resp? false
    let reservai? reserva?
  let utii? uti?
  ask one-of anestesistas [
    let i 0
    let s 0

    if(ASAi = 1)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA1)
        set i i + 1
      ]
    ]

    if(ASAi = 2)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA2)
        set i i + 1
      ]
    ]

    if(ASAi = 3)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA3)
        set i i + 1
      ]
    ]

    let puti (round (100 * s))
    if(random 100 > puti)[

```

```

        set resp? true
    ]
        if(reservai? = false)[
ifelse(resp? = false)[if(utii? = true)[
    set faltas1 faltas1 + 1
    set custol1 custol1 + custof
    if(ASAi = 1)[updateYesASA1]
    if(ASAi = 2)[updateYesASA2]
    if(ASAi = 3)[updateYesASA3]
] if(utii? = false)[
    if(ASAi = 1)[updateNoASA1]
    if(ASAi = 2)[updateNoASA2]
    if(ASAi = 3)[updateNoASA3]
] ]
[; if reserva false and resposta = t
    set cancelamentos1 cancelamentos1 + 1
    set custol1 custol1 + custoc
]]
if(reservai? = true)[
    if(utii? = false)[
        set desnecesario1 desnecesario1 + 1
        set custol1 custol1 + custod
            if(ASAi = 1)[updateNoASA1]
            if(ASAi = 2)[updateNoASA2]
            if(ASAi = 3)[updateNoASA3]
        ]
    if(utii? = true)[
        if(ASAi = 1)[updateYesASA1]
        if(ASAi = 2)[updateYesASA2]
        if(ASAi = 3)[updateYesASA3]
    ]
]

]

]

    set tpacientes tpacientes + 1
die
]

end

to avalinicial

```

```

ask pacientes with [aval? = false][
  let ASAi ASA
  let resp? false
  let reservai? reserva?
  let utii? uti?
  ask one-of anestesisistas [
    let i 0
    let s 0
    if(ASAi = 1)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA1)
        set i i + 1
      ]
    ]
    if(ASAi = 2)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA2)
        set i i + 1
      ]
    ]
    if(ASAi = 3)[
      while [i < 50][
        set s (s + item i priorASA3)
        set i i + 1
      ]
    ]
    let puti (round (100 * s))
    if(random 100 > puti)[
      set resp? true
    ]
  ]
];;
set aval? true
set reserva? resp?
]
end

to golv
  ask agents [
    let i 0
    let a 0
    let b 0
    while [i < 101][
      set a item i prior
      set prior replace-item i prior (a * (i / 100))
    ]
  ]

```

```

    set i i + 1
  ]
  set soma sum prior
  while [i < 101][
    set a item i prior
    set prior replace-item i prior (a / soma)
    set i i + 1
  ]
]
normalizar
end

to updateYesASA1
  let i 0
  let a 0
  let b 0
  while [i < 101][
    set a item i priorASA1
    set priorASA1 replace-item i priorASA1 (a * (i / 100))
    set i i + 1
  ]
  set soma sum priorASA1
  while [i < 101][
    set a item i priorASA1
    set priorASA1 replace-item i priorASA1 (a / soma)
    set i i + 1
  ]
]

end

to updateNoASA1
  let i 0
  let a 0
  let b 0
  while [i < 101][
    set a item i priorASA1
    set priorASA1 replace-item i priorASA1 (a * (1 - (i / 100)))
    set i i + 1
  ]
  set soma sum priorASA1
  while [i < 101][
    set a item i priorASA1
    set priorASA1 replace-item i priorASA1 (a / soma)
    set i i + 1
  ]
]

```



end

**to** updateYesASA2

```

    let i 0
    let a 0
    let b 0
  while [i < 101][
    set a item i priorASA2
    set priorASA2 replace-item i priorASA2 (a * (i / 100))
    set i i + 1
  ]
  set soma sum priorASA2
  while [i < 101][
    set a item i priorASA2
    set priorASA2 replace-item i priorASA2 (a / soma)
    set i i + 1
  ]

```

end

**to** updateNoASA2

```

    let i 0
    let a 0
    let b 0
  while [i < 101][
    set a item i priorASA2
    set priorASA2 replace-item i priorASA2 (a * (1 - (i / 100)))
    set i i + 1
  ]
    set soma sum priorASA2
  while [i < 101][
    set a item i priorASA2
    set priorASA2 replace-item i priorASA2 (a / soma)
    set i i + 1
  ]

```

end

**to** updateYesASA3

```

    let i 0

```

```

    let a 0
    let b 0
while [i < 101][
    set a item i priorASA3
    set priorASA3 replace-item i priorASA3 (a * (i / 100))
    set i i + 1
]
set soma sum priorASA3
while [i < 101][
    set a item i priorASA3
    set priorASA3 replace-item i priorASA3 (a / soma)
    set i i + 1
]

end

to normalizar
ask anestesisistas [
    let somaASA1 sum priorASA1
        let somaASA2 sum priorASA2
            let somaASA3 sum priorASA3

    let i 0
    let a 0
    let b 0
    let c 0
while [i < 101][
    set a item i priorASA1
    set b item i priorASA2
    set c item i priorASA3
    set priorASA1 replace-item i priorASA1 (a / somaASA1)
        set priorASA2 replace-item i priorASA2 (b / somaASA2)
            set priorASA3 replace-item i priorASA3 (c / somaASA3)

    set i i + 1
]
]
end

to novospacientes
create-pacientes navaldia [
    set aval? false
    set reserva? false
    set ASA ((random 3) + 1)
    set uti? true
if(ASA = 1)[if(random 100 > 10)[set uti? false]]
if(ASA = 2)[if(random 100 > 15)[set uti? false]]
if(ASA = 3)[if(random 100 > 40)[set uti? false]]

```

```
]

to updateNoASA3

  let i 0
  let a 0
  let b 0
  while [i < 101][
    set a item i priorASA3
    set priorASA3 replace-item i priorASA3 (a * (1 - (i / 100)))
    set i i + 1
  ]
  set soma sum priorASA3
  while [i < 101][
    set a item i priorASA3
    set priorASA3 replace-item i priorASA3 (a / soma)
    set i i + 1
  ]

end
```

---