

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Informática

**MODELO DE SIMULAÇÃO DE FILA DE TRANSPLANTES
DE FÍGADO BASEADO EM SISTEMAS MULTIAGENTES**

Alexander Flávio de Oliveira

Belo Horizonte

2010

Alexander Flávio de Oliveira

**MODELO DE SIMULAÇÃO DE FILA DE TRANSPLANTES
DE FÍGADO BASEADO EM SISTEMAS MULTIAGENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Informática pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Orientador: Ricardo Poley M. Ferreira

Belo Horizonte

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

O48m

Oliveira, Alexander Flávio de

Modelo de simulação de fila de transplantes de fígado baseado em sistemas multiagentes / Alexander Flávio de Oliveira. – Belo Horizonte, 2010.

93f. : il.

Orientador: Ricardo Poley Martins Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Informática.

Bibliografia.

1. Inteligência artificial – Teses. 2. Transplante de fígado. 3. Teoria das filas. I. Ferreira, Ricardo Poley Martins. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. III. Título.

CDU: 681.3.091:616-089.84

Bibliotecário: Fernando A. Dias – CRB6/1084



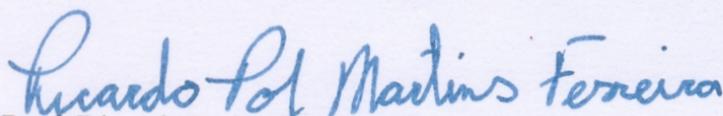
PUC Minas
Programa de Pós-graduação em Informática

FOLHA DE APROVAÇÃO

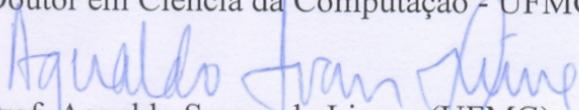
Modelo de simulação de fila de transplantes de fígado baseado em sistemas multiagentes

ALEXANDER FLÁVIO DE OLIVEIRA

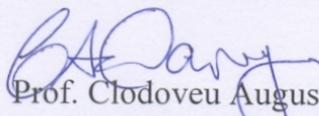
Dissertação defendida e aprovada pela seguinte banca examinadora:



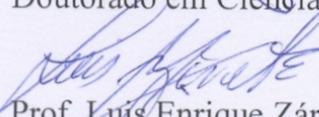
Prof. Ricardo Poley Martins Ferreira - Orientador (UFMG)
Doutor em Ciência da Computação - UFMG



Prof. Agnaldo Soares de Lima - (UFMG)
Doutor em Medicina (Gastroenterologista) - UFMG



Prof. Clodoveu Augusto Davis Junior - (UFMG)
Doutorado em Ciência da Computação - UFMG



Prof. Luis Enrique Zárate Gálvez - (PUC Minas)
Doutor em Engenharia Metalúrgica de Minas - UFMG

Belo Horizonte, 05 de março de 2010.

*À minha esposa
Wiviany.*

AGRADECIMENTOS

Começo esta seção dedicando minha sincera gratidão ao Senhor Jesus Cristo com quem tenho caminhado nestes últimos 14 anos e sem o qual nada mais faria sentido em minha vida. Continuo agradecendo:

- À minha esposa e amiga Wiviany, a quem eu admiro e amo cada dia mais, pelo apoio e compreensão indispensáveis;
- Aos meus pais e aos meus irmãos pelo carinho sempre dispensados a mim;
- Ao meu orientador Ricardo Poley pelo incentivo, pela ajuda, pelo respeito e pela amizade que me foram muito importantes nesses anos de trabalho;
- Ao meus amigos Marcelo Lopes, Vander Avelar, William Cardoso e Alessandro Perdigão, pelo precioso apoio;
- Ao Weverson, pela ajuda no tratamento e organização das informações da fila de transplantes de fígado de Minas Gerais;
- Ao Dr. Agnaldo pela atenção e pelos esclarecimentos e sugestões que muito contribuíram com o trabalho;
- À “Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior” (CAPES) e à “Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais” (PUC Minas), pela concessão da bolsa de estudos;
- Ao coordenador e aos professores do programa de pós-graduação pelo conhecimento compartilhado;
- À Giovana, secretária do mestrado, por se colocar sempre como facilitadora;
- Aos cientistas e pesquisadores cujos trabalhos serviram como base para esta pesquisa.

Termino ressaltando que, certamente, não me lembrei de todos aqueles que eu deveria. A esses, esquecidos neste momento por falha de minha memória, mas impressos definitivamente em minha história, também deixo aqui meu sincero “obrigado”.

“If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it?”

Albert Einstein

RESUMO

Geralmente, priorizar não é uma tarefa simples. Dada uma fila de transplantes de órgãos com dezenas de pacientes, qual paciente priorizar no momento da doação de um órgão? Quem está na fila há mais tempo ou aquele que possui o pior quadro clínico? Qual política seria a mais justa e eficiente? Buscar responder a essa questão pode se transformar em um problema complexo de tomada de decisão. Nesse exemplo, como em outras áreas, o processo para testar várias políticas e verificar se cada uma delas realmente trouxe benefícios pode ser lento e consumir recursos valiosos. Nesse contexto, as simulações computacionais podem auxiliar, permitindo, a um menor custo e com maior segurança e flexibilidade, a reprodução e o estudo de eventos cuja ocorrência real não seria desejável ou até mesmo possível. Os esforços nesse sentido resultam na criação de arcabouços e ferramentas para modelagem e simulação. Neste trabalho, foi desenvolvido o modelo baseado em sistemas multiagentes e implementado o simulador da fila de transplantes de fígado, utilizando a ferramenta *Repast*. O modelo foi calibrado utilizando informações de um cenário real. Foram realizados experimentos exploratórios ilustrando situações em que o modelo de simulação poderia ser utilizado. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do modelo em capturar detalhes da realidade e reproduzir cenários definidos. Além disso, o modelo permite ser estendido, conforme a necessidade, para representar cenários mais complexos.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Agentes Inteligentes, Simulação(Computadores), Teoria das Filas, Transplante de Fígado.

ABSTRACT

Generally, prioritize is not a simple task. Given a waiting list for organ transplantation with dozens of patients, which patient must be prioritized at the time of donation of an organ? Who is waiting in line for longer time or who has the worst health? What policy would be more fair and efficient? The search for an answer to this question can become a complex problem of decision-making. In this example, as in other areas, the process for testing various policies and verify whether each one of them really brought benefits or not, can be slow and consume valuable resources. In this context, computer simulations can help by allowing, at a lower cost and with greater security and flexibility, reproduction and study of events whose real occurrence would not be desirable or even possible. These efforts result in the creation of frameworks and tools for modeling and simulation. In this work, the model based on multi-agent systems was developed and implemented the simulator queue liver transplants using the Repast tool. The model was calibrated using information from a real scenario. Experiments were carried out illustrating situations in which the simulation model could be used. The results demonstrated the ability of the model to capture details of reality and simulate scenarios defined. Furthermore, the model can be extended as needed, to represent more complex scenarios.

Keywords: Artificial Intelligence, Intelligent Agents, Simulation (Computer), Queuing Theory, Liver Transplantation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Esquema de um sistema de filas baseado em (GROSS; HARRIS, 1998)	22
FIGURA 2	Dinâmica de uma fila de transplantes de fígado baseada no MELD [DADOS DA PESQUISA]	27
FIGURA 3	Estrutura básica de um agente (RUSSELL; NORVIG, 1995)	30
FIGURA 4	Esquema da dinâmica do modelo de simulação [DADOS DA PESQUISA].	43
FIGURA 5	Diagrama de transição de estados do paciente	47
FIGURA 6	Diagrama geral de classes do simulador	49
FIGURA 7	Diagrama de classes das doenças	51
FIGURA 8	Diagrama de sequência ilustrando a criação de um paciente e sua inscrição no sistema de filas.	55
FIGURA 9	Diagrama de sequência ilustrando a criação de um serviço.	56
FIGURA 10	Diagrama de sequência ilustrando a transferência do paciente transplantado para o acompanhamento pós-transplante.	56
FIGURA 11	Diagrama de sequência ilustrando a transferência do paciente transplantado para o acompanhamento pós-transplante.	58

FIGURA 12	Esquema do modelo quanto às informações utilizadas no processo de calibração [DADOS DA PESQUISA].	61
FIGURA 13	Curva de sobrevivência de pacientes em função do MELD. Fonte: (FREEMAN et al., 2002)	66
FIGURA 14	Curva de sobrevivência de pacientes em função do MELD obtida a partir da tabela 2	67
FIGURA 15	Disciplina <i>pior-primeiro</i> - <i>Diferença</i> de óbitos pré-transplante e transplantes em função da variação da disponibilidade de fígados na fila inicial igual a zero, baseado nos dados da tabela 27	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Compatibilidade por tipo sanguíneo	46
TABELA 2	Probabilidade de óbito em função do MELD	67
TABELA 3	Percentual de pacientes ativos na fila de transplantes de fígado de 1997 a 2006	68
TABELA 4	Valor absoluto da diferença entre o valor por faixa da média e cada ano	68
TABELA 5	Valores de 2003 ajustados para compôr 100%	69
TABELA 6	Probabilidade de tipo sanguíneo de fígado e paciente	71
TABELA 7	Probabilidade de tamanho de fígado e paciente	71
TABELA 8	Probabilidade de morte pelo MELD	71
TABELA 9	Ocorrência de doenças na fila de transplantes de fígado de Belo Horizonte	72
TABELA 10	Probabilidade de doença	73
TABELA 11	Cenário - Censo da lista de espera por fígado no estado de São Paulo em 2008	74

TABELA 12	Fórmulas dos <i>dados de entrada</i> extraídos do cenário	74
TABELA 13	Valores dos <i>dados de entrada</i> extraídos do Censo 2008	75
TABELA 14	Fórmulas dos <i>dados de referência</i> extraídos do Censo 2008	76
TABELA 15	Valores dos <i>dados de referência</i> extraídos do Censo 2008	76
TABELA 16	Comparação dos <i>dados de saída</i> com os <i>dados de referência</i> ao final da calibração	78
TABELA 17	Cenário - Censo da lista de espera por fígado no estado de São Paulo em 2007	79
TABELA 18	Fórmulas dos <i>dados de entrada</i> extraídos do cenário	80
TABELA 19	Valores dos <i>dados de entrada</i> extraídos do Censo 2007	80
TABELA 20	Fórmulas dos <i>dados de referência</i> extraídos do Censo 2007	81
TABELA 21	Valores dos <i>dados de referência</i> extraídos do Censo 2007	82
TABELA 22	Comparação dos <i>dados de saída</i> com os <i>dados de referência</i> ao final da simulação	82
TABELA 23	Comparação da <i>diferença</i> em função das disciplinas	84
TABELA 24	Efeito no óbito pré-transplante variando a disponibilidade de fígados	86

TABELA 25	Efeito no número de transplantes variando a disponibilidade de fígados	87
TABELA 26	Valores de referência em um cenário hipotético de uma fila de tamanho inicial zero	87
TABELA 27	Disciplina <i>pior-primeiro</i> - <i>Diferença</i> de óbitos pré-transplante e transplantes em função da variação da disponibilidade de fígados na fila inicial igual a zero	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização do Problema	16
1.2	Objetivos	18
1.3	Estrutura da Dissertação	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Fila de Espera	20
2.2	Fila de Transplante de Fígado	24
2.2.1	<i>MELD</i>	25
2.2.2	<i>Processo de Transplante</i>	27
2.3	Inteligência Artificial	29
2.3.1	<i>Agentes Autônomos</i>	29
2.3.2	<i>Sistemas Multiagentes</i>	31
2.3.3	<i>Simulação Baseada em Agente</i>	32
2.3.4	<i>Plataforma de Simulação Baseada em Agente</i>	34
2.4	Simulação de Filas de Transplantes	36
3	SIMULAÇÃO DE UMA FILA DE TRANSPLANTES DE FÍGADO	40
3.1	Visão Geral do Modelo	41
3.2	Dinâmica da Simulação	44
3.2.1	<i>Sistema de Filas, Serviço e Acompanhamento pós-transplante</i>	45
3.2.2	<i>O Paciente</i>	46
3.2.2.1	<u>“Doente” e “Doente novamente”</u>	46

3.2.2.2	<u>“Transplantado” ou “Retransplantado”</u>	48
3.2.2.3	<u>“Curado” ou “Falecido”</u>	48
3.2.3	<i>O Fígado</i>	48
3.2.4	<i>A chegada de Pacientes e Fígados</i>	49
3.3	Definição de Agentes e Entidades do Modelo	49
3.3.1	<i>Doença</i>	50
3.3.2	<i>Paciente</i>	51
3.3.3	<i>Fígado</i>	53
3.3.4	<i>Disciplina</i>	54
3.3.5	<i>Fonte</i>	54
3.3.6	<i>Serviço</i>	55
3.3.7	<i>Sistema de Filas</i>	56
3.3.8	<i>Acompanhamento Pós-transplante</i>	57
3.3.9	<i>Relatório</i>	58
4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	60
4.1	Calibração do Modelo	60
4.1.1	<i>Tipos das Informações Utilizadas pelo Modelo</i>	61
4.1.1.1	<u>Dados de Entrada</u>	62
4.1.1.2	<u>Parâmetros</u>	62
4.1.1.3	<u>Dados de Saída</u>	63
4.1.2	<i>Origem dos dados</i>	65
4.1.2.1	<u>Relatório da análise dos dados dos pacientes da Fila de Transplantes de Belo Horizonte</u>	65
4.1.2.2	<u>Artigo <i>The new liver allocation system</i></u>	65
4.1.2.3	<u>Relatório anual de 2007 - OPTN</u>	66
4.1.3	<i>Configuração Inicial</i>	69

4.1.3.1	<u>Paciente</u>	69
4.1.3.2	<u>Fontes</u>	70
4.1.4	<i>Cenário</i>	73
4.1.5	<i>Metodologia de Calibração</i>	76
4.2	Estudo de Caso	78
4.2.1	<i>Cenário</i>	78
4.2.2	<i>Metodologia de Simulação do Estudo de Caso</i>	82
4.3	Experimentos Exploratórios	83
4.3.1	<i>Comparação das políticas de alocação</i>	84
4.3.2	<i>Aumento da disponibilidade de fígados</i>	85
4.4	Análise dos Resultados	88
4.4.1	<i>Modelo de Simulação</i>	88
4.4.2	<i>Experimentos</i>	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
5.1	Visão Geral e Contribuições do Trabalho	90
5.2	Trabalhos Futuros	93
5.2.1	<i>O Modelo de Simulação</i>	93
5.2.2	<i>Parâmetros e Experimentos</i>	94
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Todas as pessoas, em algum momento de suas vidas, enfrentam uma fila de espera. A fila de espera “constitui uma etapa inevitável em inúmeras situações da vida urbana” (IGLESIAS; GÜNTHER, 2007).

As filas possuem um importante papel na sociedade moderna, pois são aplicadas em inúmeras situações, constituindo, portanto, um rico campo de pesquisa. Essa importância ressalta a necessidade do seu estudo e análise, atraindo pesquisadores que vêm de diferentes áreas do conhecimento devido à variedade de contextos em que as filas podem ser aplicadas. Como resultado do esforço desses cientistas em estudar as filas e suas aplicações, são propostos modelos, geralmente matemáticos, que as representem.

Entretanto, embora úteis, os modelos matemáticos encontram dificuldades em capturar detalhes do ambiente e representar aspectos qualitativos, como preferências e comportamentos, que, geralmente, são características associadas ao indivíduo (ALMEIDA, 2007).

Diante das limitações dos modelos matemáticos clássicos, têm surgido trabalhos utilizando a abordagem baseada em agentes. Sua principal característica consiste no fato de que o foco é mantido nos indivíduos, sendo capaz de capturar detalhes da realidade em uma granularidade mais fina.

No Brasil, os pacientes à espera de um transplante de fígado eram organizados em uma fila cronológica. Embora uma fila cronológica cumprisse o papel de organização e objetividade, sua utilização trazia efeitos colaterais como o inchaço da fila. A partir de 2006, a fila passou a ser ordenada pela gravidade dos pacientes, mas ainda não resolvia algumas questões. Por exemplo: quem deve ser transplantado primeiro, o paciente mais grave ou o paciente que está na fila há mais tempo mas apresenta uma condição de saúde estável? Geralmente, priorizar não é uma tarefa simples e pode se transformar em um

problema complexo de tomada de decisão.

O processo para testar políticas e verificar se trazem benefícios pode ser lento e consumir recursos, pois é necessário aguardar até que os resultados de cada uma das políticas adotadas sejam comparados. Nesse contexto, os modelos computacionais de simulação surgem como aliados.

As simulações computacionais podem auxiliar no processo de análise e otimização de sistemas complexos, permitindo, a um menor custo e com maior segurança e flexibilidade, a reprodução e o estudo de eventos cuja ocorrência real não seria desejável ou até mesmo possível. Os esforços nesse sentido resultam no desenvolvimento de pesquisas para a criação de arcabouços e ferramentas para modelagem e simulação.

Um relatório, publicado pela Sociedade Brasileira de Computação em 2006, apresenta como um dos grandes desafios da Computação no Brasil para a próxima década a modelagem e a simulação de ambientes artificiais computacionais. Esses ambientes incluem fenômenos naturais e ambientais (erosão do solo e tornados), de interações humanas (migração de populações e mercados econômicos) ou uma combinação dos dois casos (proliferação de doenças) (VALADÃO, 2009).

A criação de um modelo de simulação computacional da fila de prioridades para transplantes pode auxiliar os gestores do sistema de transplantes a tomarem decisões. O simulador funciona como um laboratório onde podem ser respondidas perguntas do tipo “*what if*” (*e se*). As respostas a essas questões podem, por exemplo, orientar os órgãos públicos na alocação mais eficiente e eficaz dos recursos e ajudar a salvar vidas.

São encontrados na literatura, simuladores de filas tais como (BERTOLI; CASALE; SERAZZI, 2006) e (LOPES, 2007). Também são encontrados, mais especificamente, simuladores de filas de transplantes de fígado, dentre os quais (THOMPSON et al., 2004) e (TENG; KONG, 2008) podem ser citados.

Considerando a relevância do problema das filas e as limitações atuais dos modelos e ferramentas existentes, neste trabalho, foi desenvolvido o modelo e o simulador da fila de transplantes de fígado utilizando a abordagem de sistemas multiagentes (SMA)¹ (SANDHOLM, 1999), na qual os modelos são baseados em agentes/indivíduos (MBA/MBI)².

O modelo proposto pode ser utilizado para explorar, de forma empírica, diferentes

¹Do inglês - Multiagent Systems - MAS

²Do inglês - Agent/Individual Based Model - ABM/IBM

cenários partindo das clássicas perguntas “*what if*”. Essa abordagem apresenta desafios e dificuldades, encontrados durante a modelagem dos agentes. A representação de cada elemento no sistema e suas interações originam um sistema complexo.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa se interessou pela utilização das filas na organização de pacientes à espera de um transplante de fígado, considerando os problemas que advêm do processo de tomada de decisão sobre a definição de sua política de ordenação e prioridade.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi propor e implementar um modelo de simulação baseado em sistemas multiagentes de uma fila de transplantes de fígado, considerando algumas de suas características como as políticas de prioridade.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. Neste capítulo, o trabalho é introduzido e o objetivo é definido.

O capítulo 2 apresenta a bibliografia mais relevante utilizada no desenvolvimento desta pesquisa. Também apresenta conceitos básicos sobre a fila de espera, uma introdução à Teoria das Filas e ainda discorre sobre a fila de transplantes de fígado, sua ordenação e o mecanismo de alocação *fígado-paciente*. Introduz a Inteligência Artificial, os Sistemas Multiagentes e a Simulação Baseada em Agentes e comenta as principais ferramentas utilizadas para a criação de modelos de simulação baseados em sistemas multiagentes. Apresenta o *Repast*, arcabouço escolhido para a construção do simulador apresentado nesta dissertação. Por último, discorre sobre a utilização da computação no problema da fila de transplantes.

No capítulo 3, o modelo de simulação é apresentado e descrito. Nele, são detalhados os agentes, entidades do modelo e os submodelos e parâmetros utilizados para orientar o comportamento e a tomada de decisão dos agentes. São apresentados e descritos os dados de entrada fornecidos ao simulador e os dados de saída produzidos por ele. A dinâmica da simulação também é apresentada, bem como o comportamento dos agentes envolvidos e o modelo de *software* do simulador.

No capítulo 4, a metodologia adotada, o cenário definido, os tipos e a origem das informações utilizadas e os experimentos realizados com o objetivo de calibrar o simulador

são descritos. São apresentados experimentos utilizados para submeter o simulador a testes e ilustrar situações em que ele poderia ser utilizado para auxiliar o estudo de diferentes aspectos do comportamento da fila de transplantes. Ao final, os resultados dos experimentos são analisados.

Finalmente, o capítulo 5 apresenta conclusões e tece comentários a respeito desta pesquisa, sugerindo trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os trabalhos utilizados como base para o desenvolvimento desta dissertação e foi dividido em seções.

A seção 2.1 apresenta a fila de espera e introduz seus conceitos estudados pela Teoria das Filas, área de pesquisa inaugurada pelo matemático Agner Krarup Erlang.

A seção 2.2 discorre sobre a fila de transplantes de fígado, apresenta o MELD (*Model of End-Stage Liver Disease*) e discorre sobre sua utilização como índice de ordenação dessa na fila. Em seguida, fornece um breve resumo do processo de transplantes de fígado e do mecanismo de alocação *fígado-paciente*.

A seção 2.3 apresenta a Inteligência Artificial e sua subárea de estudo sobre os agentes. Introduz conceitos sobre os Sistemas Multiagentes e discorre sobre a Simulação Baseada em Agentes. Enfim, comenta ferramentas utilizadas para a criação de modelos de simulação baseados em sistemas multiagentes e apresenta o Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*)¹, que foi o arcabouço escolhido para a construção do simulador desta dissertação.

Finalmente, a seção 2.4 discorre sobre a utilização da computação na área da saúde e estudos específicos sobre o problema da fila de transplantes.

2.1 Fila de Espera

Segundo (IGLESIAS; GÜNTHER, 2007), a fila de espera² “constitui uma etapa inevitável em inúmeras situações da vida urbana, cumprindo a função de alocar serviços, produtos, espaço e organizar interações”. A fila é um fenômeno importante por representar pontos que requerem atenção em um determinado processo e que, geralmente, possui

¹<http://repast.sourceforge.net/>

²Geralmente, uma “fila de espera” nos Estados Unidos é chamada de “*waiting line*”, enquanto que, na Inglaterra e em outros países e também em trabalhos científicos, costuma-se utilizar o termo de origem francesa “*queue*” ou sua variação “*queueing*” como em “*Queueing Theory*” (Teoria das Filas) (GROSS; HARRIS, 1998).

desdobramentos de cunho econômico.

Entretanto, o interesse pelas filas extrapola a esfera econômica e de produção e atrai pesquisadores de áreas e com interesses diversos que se estendem a temas políticos, sociológicos e antropológicos. Por exemplo, as filas são analisadas por serem consideradas, sob o ponto de vista psicológico, um sistema social específico porque seus usuários são expostos a uma série de fenômenos de comportamento e, nesse caso, uma fila pode ser utilizada como uma amostra representativa para o estudo do comportamento típico da população de uma localidade (IGLESIAS; GÜNTHER, 2007).

As filas são simples de serem organizadas e a ideia de que *se alguém chegou antes deve ser atendido antes* é tão intuitiva que faz com que as filas façam parte do dia-a-dia das pessoas e sejam frequentemente utilizadas para organizar o acesso a recursos. Observando com um pouco de atenção, percebe-se que as sociedades modernas fazem uso ostensivo das filas. Acessar o caixa do banco, comprar um bilhete no cinema, sair do estacionamento de um shopping, são situações comuns de congestionamento em áreas urbanas que provocam a geração de filas (HILLIER; LIEBERMAN, 2004).

Além dessas filas “visíveis”, a sociedade moderna faz uso de uma imensa variedade de filas “virtuais”. Essas filas organizam atividades cotidianas das quais dependem muitos serviços, como o controle do acesso em uma Central de Teleatendimento e a impressão de documentos em uma impressora da rede.

As filas se formam onde há maior demanda por um certo serviço do que disponibilidade em fornecê-lo. Essa discrepância pode ser causada por vários fatores como a escassez de um determinado recurso e a inviabilidade, econômica ou de outro tipo, de aumentar sua disponibilidade. Seja qual for a sua natureza e a de seus elementos, um sistema de filas típico pode ser descrito como clientes chegando para serem servidos, esperando pelo serviço se este não for imediato e saindo do sistema após serem servidos, conforme apresentado pela figura 1. Por clientes, entende-se qualquer entidade que aguarde por um serviço, como, por exemplo, processos computacionais aguardando pelo seu *quantum*³ (GROSS; HARRIS, 1998).

A fila também pode ser entendida como uma tentativa de organizar, de uma maneira minimamente justa, o acesso a um determinado recurso (HILLIER; LIEBERMAN, 2004). (IGLESIAS; GÜNTHER, 2007) enfatizam que “filas organizam o acesso baseado num princípio igualitário quando não há como atender ao mesmo tempo certo número de pes-

³Fatia de tempo recebida por um processo para utilização do processador compartilhado com outros processos em sistemas de tempo compartilhado (*time-sharing*).

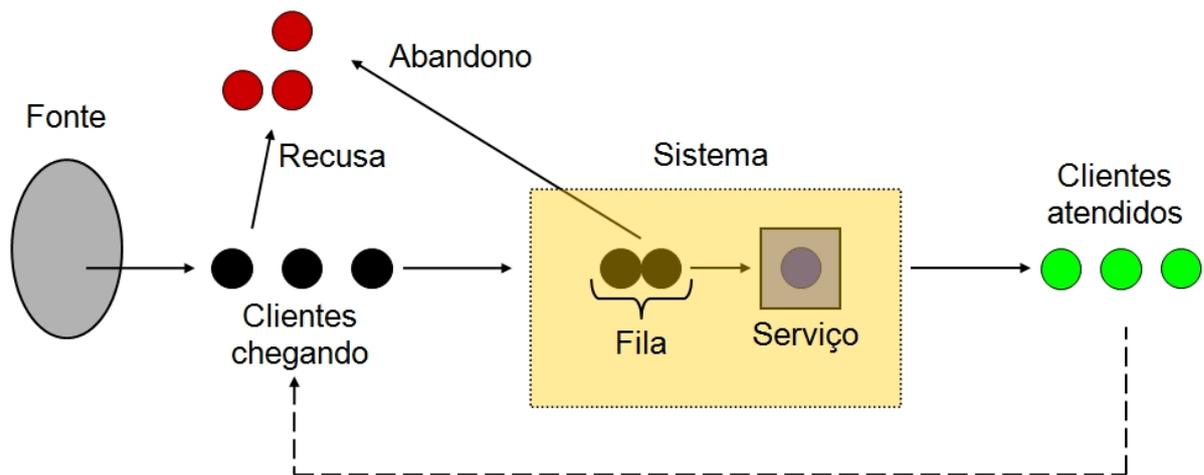


Figura 1: Esquema de um sistema de filas baseado em (GROSS; HARRIS, 1998)

soas, protegendo assim a prioridade das que chegaram antes”. As filas que respeitam a ordem de chegada são chamadas PEPS ou “Primeiro a Entrar Primeiro a Sair”⁴.

Entretanto, em alguns casos, a ordem natural de chegada na fila não é suficiente para alcançar esse objetivo de justiça. Quando isso acontece, é necessário aplicar ordenações especiais aos elementos da fila, chamadas de políticas de prioridade ou *disciplinas*.

A disciplina de uma fila refere-se à ordem pela qual os clientes que estão nessa fila são selecionados para serem atendidos (GROSS; HARRIS, 1998). Um exemplo disso é a prioridade dada aos idosos, gestantes e pais com crianças de colo nas filas de banco. Às filas que adotam uma política especial de ordenação dá-se o nome de fila de prioridades e geralmente são identificadas por alguma abreviatura que indique sua disciplina, como a UEPS “Último a Entrar Primeiro a Sair”⁵ que possui uma ordem inversa à PEPS.

Embora o uso de uma disciplina forneça mais flexibilidade e sofisticação às filas, sua utilização traz desdobramentos quanto à definição de qual disciplina utilizar para obter melhores resultados. Dada uma fila de transplantes de fígado, por exemplo, com dezenas, ou até milhares, de pacientes inscritos, qual paciente deveria ser priorizado no momento em que um órgão for doado de forma que o resultado seja mais justo e eficiente? Percebe-se, portanto, priorizar não é uma tarefa simples e pode se transformar em um problema complexo de tomada de decisão.

Difícilmente discorda-se de que é um incômodo aguardar em filas de espera. Por isso, dada uma fila, poderá ocorrer seu abandono em função da impaciência dos clientes.

⁴Do inglês *FIFO* (*First In First Out*) ou *FCFS* (*First Come First Served*).

⁵Do inglês *LIFO* (*Last In First Out*).

A impaciência pode se manifestar de três formas. Em primeiro lugar, pode haver a *recusa*⁶ do cliente em ingressar na fila se ele considerá-la muito longa. Em segundo lugar, pode ocorrer a *desistência*⁷ quando o tempo de espera para o atendimento for estimado demasiadamente longo pelo cliente, ou seja, se a força que o impele a sair for maior que o seu interesse ou necessidade pelo serviço, haverá a *desistência*. Em terceiro, poderá ocorrer a *troca de filas*⁸, quando houver vários atendentes com filas paralelas (GROSS; HARRIS, 1998).

Para ilustrar a impaciência e seus tipos, pode-se imaginar um supermercado. No primeiro cenário, um cliente que chega ao supermercado e desiste de realizar suas compras naquele lugar porque verificou que as filas estão muito grandes. No segundo cenário, um cliente que já está na fila, estimando que aguardará nela por muito tempo, abandona o supermercado desistindo da compra. No terceiro cenário, um cliente fica alternando entre as filas, procurando pela fila mais curta ou cujo atendimento pareça mais rápido.

A impaciência não é desejável e, para evitá-la, o tamanho da fila, bem como o tempo de espera de seus ocupantes, devem ser minimizados. Mas isso, geralmente, não é uma tarefa trivial e envolve investimentos que, caso venham a ser aplicados, devem ser bem planejados (GROSS; HARRIS, 1998).

Para um planejamento minucioso e um resultado eficaz, é importante capturar informações sobre a fila e analisá-las para que seja possível aferir a qualidade do atendimento, identificar os possíveis problemas e buscar ações para atenuá-los ou, se possível, extingui-los, almejando o menor custo possível. Nesse contexto, surge a importância e a aplicação do estudo das filas, chamado de “Teoria das Filas”⁹, que remonta a 1909, quando o matemático dinamarquês Agner Krarup Erlang¹⁰ publicou o primeiro artigo da área¹¹ (GROSS; HARRIS, 1998).

A Teoria das Filas é o estudo da formação das filas, suas propriedades e seu comportamento em diferentes contextos. São usados modelos de fila para representar os diversos tipos de sistemas de filas. Desses modelos, é possível extrair uma série de informações como, por exemplo, o tempo médio de espera na fila, obtendo valores para calibração do sistema de filas e permitindo dimensioná-lo para evitar desperdícios e gargalos, sem

⁶Do inglês “*balking*”.

⁷Do inglês “*reneging*”.

⁸Do inglês “*jockeying*”.

⁹Do inglês “*Queueing Theory*”.

¹⁰Nascido em 1 de Janeiro de 1878 - Falecido em 3 de Fevereiro de 1929.

¹¹ERLANG. “*The Theory of Probabilities and Telephone Conversations*”, *Nyt Tidsskrift for Matematik B*, vol 20, 1909.

sacrificar a satisfação dos clientes e a viabilidade econômica para o provedor do serviço (HILLIER; LIEBERMAN, 2004).

(GROSS; HARRIS, 1998) destacam seis elementos básicos que descrevem um sistema de filas: o padrão de chegada dos clientes, o padrão de atendimento dos servidores, a disciplina da fila, a capacidade do sistema, o número de canais de atendimento e o número de estágios do serviço. (GROSS; HARRIS, 1998) também relacionam três principais tipos de indicadores de desempenho de um sistema de filas: uma medida que indique o tempo de espera que um cliente enfrentará até ser atendido, um indicador de quanto os clientes podem se acumular e uma medida do tempo ocioso dos servidores.

2.2 Fila de Transplante de Fígado

O avanço da medicina tornou possível o transplante de órgãos e, através dessa técnica, as vidas de muitas pessoas são salvas. No Brasil, segundo dados do Ministério da Saúde, o programa de transplantes do Sistema Único de Saúde (SUS) é o segundo maior do mundo, superado apenas pelo da Espanha, tendo realizado 87.444 transplantes no período de 2001 a junho de 2007, e arcando, apenas em 2006, com uma despesa de R\$ 464,8 milhões (Ministério da Saúde, 2007).

Entretanto, por diversos fatores, como a quantidade de órgãos disponíveis e os recursos para coletá-los e aloca-los, não é possível atender totalmente à demanda, fazendo com que, em junho de 2007, 71.152 brasileiros ainda estivessem aguardando órgãos para transplante (Ministério da Saúde, 2007).

Com o objetivo de organizar o acesso aos órgãos doados, os pacientes são organizados em filas. Essa medida, entretanto, traz implicações sobre como essas filas devem ser organizadas e a definição de qual paciente deve ser priorizado no momento em que um órgão é doado. Buscando resposta para essas questões, há, atualmente, estudos sobre políticas de prioridades nas filas de transplantes de órgãos que buscam aumentar a eficiência do sistema, resguardando a ética médica, os direitos humanos e a justiça distributiva. A fila de transplantes de fígado pode ser citada como um exemplo.

Segundo o Conselho Regional de Medicina do Estado de Minas Gerais (CRMMG), no Brasil, foram realizados cerca de 1.000 transplantes em 2006 e, em 2007, mais de 7.000 pessoas aguardavam por um transplante de fígado (COLLUCCI, 2007).

Em 1997, a fila de transplantes de fígado passou a ser organizada por ordem de inscrição dos pacientes sob a justificativa de inibir fraudes e em uma tentativa de organizar,

de uma maneira minimamente justa, o acesso aos órgãos (LIMA, 2006).

Embora mais objetiva e transparente, essa forma de organização dos pacientes em uma fila PEPS causou efeitos colaterais. Sabendo que, no futuro, seus pacientes necessitariam de um transplante, os médicos passaram a inscrevê-los precocemente na fila, com o intuito de que, quando houvesse a real necessidade de um transplante, eles ocupassem as primeiras posições da fila e, conseqüentemente, tivessem uma chance maior de serem transplantados (LIMA, 2006). Esse comportamento generalizado causou um inchaço da fila, prejudicando aqueles pacientes com necessidade iminente de transplante que chegavam na fila com menor prioridade que os pacientes que já se encontravam inscritos nela.

Buscando inibir a inscrição precoce de pacientes e, principalmente, reduzir a mortalidade na fila de espera (LIMA, 2006), a política de ordenação da fila de transplantes de fígado no Brasil passou por mudanças em julho de 2006, quando foi adotada a política de priorização por gravidade do paciente baseada no MELD (Ministério da Saúde, 2006a), conforme prescrito na Portaria sob o número 1.160, de 29 de maio de 2006 do Ministério da Saúde, publicada no Diário Oficial da União (DOU) de 31 de maio de 2006 (Ministério da Saúde, 2006b).

Nesta seção, a subseção 2.2.1 apresenta o MELD e discorre sobre sua utilização como índice de ordenação dos pacientes na fila de transplantes e a subseção 2.2.2 fornece um breve resumo do processo de transplantes de fígado e do mecanismo de alocação *fígado-paciente*.

2.2.1 MELD

O MELD é um modelo matemático que recebe como entrada parâmetros fisiológicos do paciente, obtidos através de exames laboratoriais, e retorna um valor. O valor do MELD pode variar de 6 a 40 e aponta o percentual de risco de o paciente vir a falecer nos próximos três meses. Os parâmetros utilizados pela função do MELD são:

- Bilirrubina: é uma das substâncias eliminadas pelo organismo e aproveitada pelo fígado para outras finalidades. Quando sua quantidade, medida em *mg* por *dl* de sangue, está alta, significa que o fígado não está conseguindo realizar essa função de reaproveitamento.
- Creatinina: sua quantidade, medida em *mg* por *dl* de sangue, está inversamente relacionada ao bom funcionamento dos rins. É utilizada na avaliação do fígado porque um fígado debilitado sobrecarrega e prejudica o funcionamento dos rins.

- RNI: a Protrombina é uma proteína que participa do processo da coagulação e é sintetizada no fígado. Mede-se pelo tempo de coagulação, ou seja, tempo de protrombina, p.ex. 35 segundos - se o tempo é longo até coagular, existe pouca protrombina na amostra de sangue examinado. Fala-se também em Atividade de Protrombina, expresso em %, ou seja, função ótima - 100% ou próximo. Entretanto, para dizer se um tempo de protrombina ou a atividade de protrombina é x ou y, baseia-se em um padrão fornecido. A relação normatizada (padronizada) da protrombina, ou RNI ¹² vem da utilização desse padrão.

Segundo (FREEMAN et al., 2002) e (Ministério da Saúde, 2006b), o MELD é obtido pela fórmula:

$$MELD = \lfloor (0,957 \times \ln(creatinina) + 0,378 \times \ln(bilirrubina) + 1,120 \times \ln(RNI) + 0,643) \times 10 + 0,5 \rfloor$$

Observações quanto à fórmula do MELD (Ministério da Saúde, 2006b):

- Caso os valores de laboratório sejam menores que 1, arredondar para 1,0;
- A creatinina poderá ter valor máximo de 4,0. Caso seja maior que 4,0 considerar 4,0;
- Caso o paciente necessite realizar diálise mais de duas vezes por semana, automaticamente adota-se 4,0 como valor da creatinina.

Através do valor do MELD, os pacientes são ordenados na fila, onde quem possui maior MELD possui a maior prioridade (HUO et al., 2005). A frequência de atualização do índice MELD de um paciente é definida pelo intervalo em que se encontra o seu índice MELD atual. A figura 2 apresenta um esquema da dinâmica de alocação de um paciente na fila segundo a priorização baseada no MELD.

A fila de transplantes de fígado no Brasil sofreu mudanças em sua política de ordenação em 1997, quando passou a ser organizada por ordem de inscrição dos pacientes (PEPS), e em 2006, quando passou a ser organizada pelo índice de gravidade do paciente (MELD). A cada nova política adotada, só se pode verificar se houve benefício depois de algum tempo implantada.

¹²Do inglês “*International Normalized Ratio*” (INR).

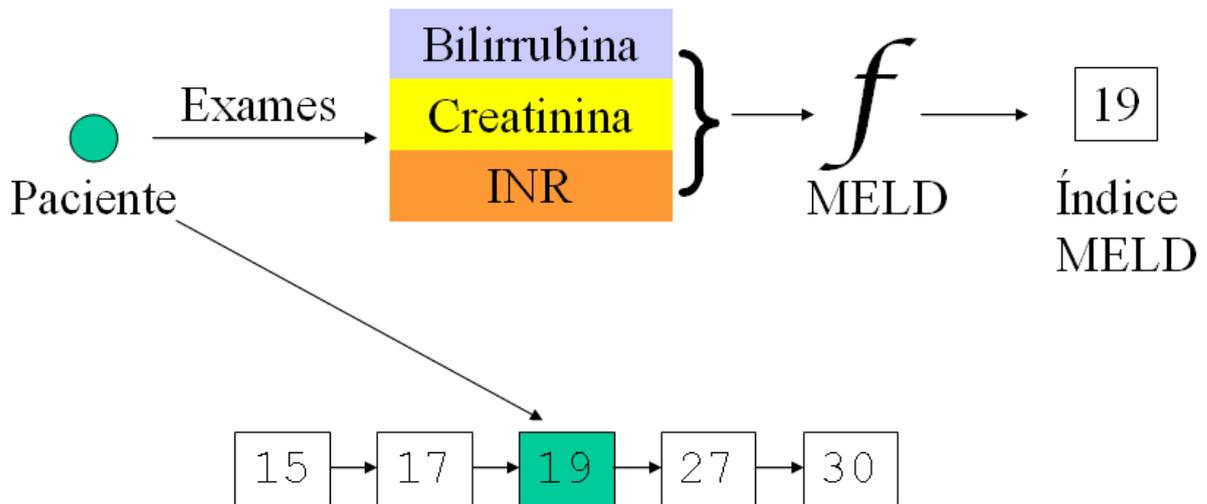


Figura 2: Dinâmica de uma fila de transplantes de fígado baseada no MELD [DADOS DA PESQUISA]

No entanto, o coordenador do Grupo de Transplantes do Instituto Alfa de Gastroenterologia do Hospital das Clínicas de Belo Horizonte, Dr. Agnaldo Soares, suspeita que vários fatores contribuem para que o MELD não seja aderente à realidade. Sobre esses fatores, ele ressalta que a decisão de adotar o MELD como índice para ordenação da fila de transplantes de fígado baseou-se na observação de uma amostra estatisticamente pequena, com cerca de 200 casos. Levanta também que a alta variabilidade biológica do ser humano pode fazer com que resultados de exames de dois indivíduos, ainda que possuam valores parecidos, não representem estados de saúde semelhantes, contaminando as observações da amostra. Além disso, cita o problema da escassez de doadores de órgãos no Brasil e a carência de um modelo que permita apontar, de antemão, qual seria a quantidade mínima de doadores para que o sistema MELD fosse mais eficiente em Belo Horizonte [DADOS DA PESQUISA].

A única forma de sua suspeita ser confirmada ou não é após a análise dos dados obtidos como resultado de anos de implantação do MELD, ou seja, um processo lento que pode consumir recursos que poderiam ter sido aplicados de forma mais eficiente, resultando em maiores benefícios à sociedade.

2.2.2 *Processo de Transplante*

O processo do transplante com doador falecido (ou doador cadavérico) de um paciente inscrito na fila de transplantes envolve uma série de fatores.

Sob o ponto de vista do doador, o processo é iniciado quando a equipe de transplantes recebe a informação sobre um potencial doador. A notificação de um possível paciente doador de órgãos e tecidos em estado de morte encefálica por todos os hospitais é obrigatória pela Lei. Se a condição do doador for considerada aceitável, a equipe de transplantes entra em contato com o receptor designado pela Central de Transplantes, solicitando sua internação hospitalar (GRUPO DE HEPATOLOGIA & TRANSPLANTE DE FÍGADO,).

Então, uma equipe especializada entra em contato com a família do potencial doador com o objetivo de obter uma autorização para que o órgão seja doado. Uma vez doado, o órgão precisa ser retirado do doador, cuidadosamente acondicionado e transportado para ser transplantado no paciente receptor o mais rápido possível. Enquanto o paciente receptor é preparado, uma equipe de cirurgiões é encarregada de fazer a captação do fígado do doador. O órgão é criteriosamente avaliado e, caso o fígado do doador, também chamado de enxerto hepático, não seja considerado viável para o transplante, a operação é cancelada e o Receptor recebe alta hospitalar. Caso contrário, o fígado será removido do doador e receberá alguns cuidados para sua preservação e armazenamento (HOSPITAL MERIDIONAL,).

Do lado receptor, os pacientes acometidos por hepatopatias são inscritos pelos seus médicos na fila de espera. Através de exames laboratoriais, seu MELD é calculado e, em função do valor do MELD, os pacientes são ordenados na fila de espera do maior para o menor. Esses exames laboratoriais são realizados em uma frequência determinada para cada paciente conforme seu valor MELD obtido no último exame, onde quanto maior é o valor do índice MELD, maior é a frequência de realização dos exames.

Quando um fígado é doado, um paciente compatível é procurado na fila de espera respeitando a ordenação por MELD. A compatibilidade é verificada pelo tamanho e pelo tipo sanguíneo do doador e do receptor. Ao mesmo tempo, a equipe do paciente receptor é informada sobre as condições do fígado do doador, para só então dar início à cirurgia. A cirurgia do paciente receptor dura em média de 6 a 8 horas, consistindo na retirada de todo o fígado doente seguida do implante do novo fígado por meio de suturas vasculares e biliares (GRUPO DE HEPATOLOGIA & TRANSPLANTE DE FÍGADO,).

Após o transplante, o paciente precisa de acompanhamento médico para minimizar a ocorrência de problemas de rejeição do órgão pelo organismo do receptor e a falha do enxerto, ou seja, a falha do órgão transplantado.

2.3 Inteligência Artificial

A Inteligência Artificial (IA) está cada vez mais presente em nossos dias. Suas técnicas sustentam ferramentas e dispositivos utilizados por uma crescente quantidade de pessoas. Como exemplo, podemos citar os jogos digitais, mecanismos de busca na web e técnicas de Mineração de Dados.

A IA tem sido utilizada com sucesso em pesquisas que têm conseguido capturar fenômenos com maior riqueza de detalhes que as abordagens convencionais. Pode-se citar como exemplo, (LOPES, 2007) que modelou o comportamento de uma Central de Teleatendimento e (ALMEIDA, 2007) que modelou o comportamento do mosquito transmissor da Dengue, *Aedes aegypti*, ambos utilizando a abordagem baseada em agentes, uma subárea da IA.

(JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998) afirmam que a IA é a área científica que mais contribui com o desenvolvimento dos estudos no campo dos agentes autônomos, pois, dedica bastante esforço à concepção de artefatos inteligentes. Concluem dizendo que, se esses artefatos inteligentes, de alguma forma, percebem e agem sobre um ambiente, eles podem ser considerados agentes.

Nesta seção, a subseção 2.3.1 introduz os agentes autônomos, apresentando um breve histórico e aspectos relacionados ao seu conceito.

A subseção 2.3.2 apresenta a área de estudos sobre os sistemas multiagentes.

A subseção 2.3.3 discorre sobre a simulação baseada em agentes e fornece exemplos de sua utilização como ferramenta e área de pesquisa.

Finalmente, a subseção 2.3.4 apresenta e comenta ferramentas utilizadas para a criação de modelos de simulação baseados em sistemas multiagentes.

2.3.1 Agentes Autônomos

Os agentes autônomos representam uma maneira de analisar, projetar e implementar sistemas computacionais complexos. Essa abordagem oferece um repertório poderoso de ferramentas, técnicas e metáforas que têm o potencial de melhorar consideravelmente a forma como as pessoas podem conceber e implementar vários tipos de *software* (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998).

Segundo (MAES, 1995), “*agentes autônomos são sistemas computacionais que ha-*

bitam algum ambiente de dinâmica complexa, sentem e agem autonomamente neste ambiente e, fazendo isso, realizam uma série de objetivos ou tarefas para os quais foram designados”. Portanto, a noção de agente envolve sua percepção do ambiente através de sensores e a tomada de decisão baseada nessas informações, seguida da ação. A figura 3 apresenta o modelo clássico de um agente autônomo.

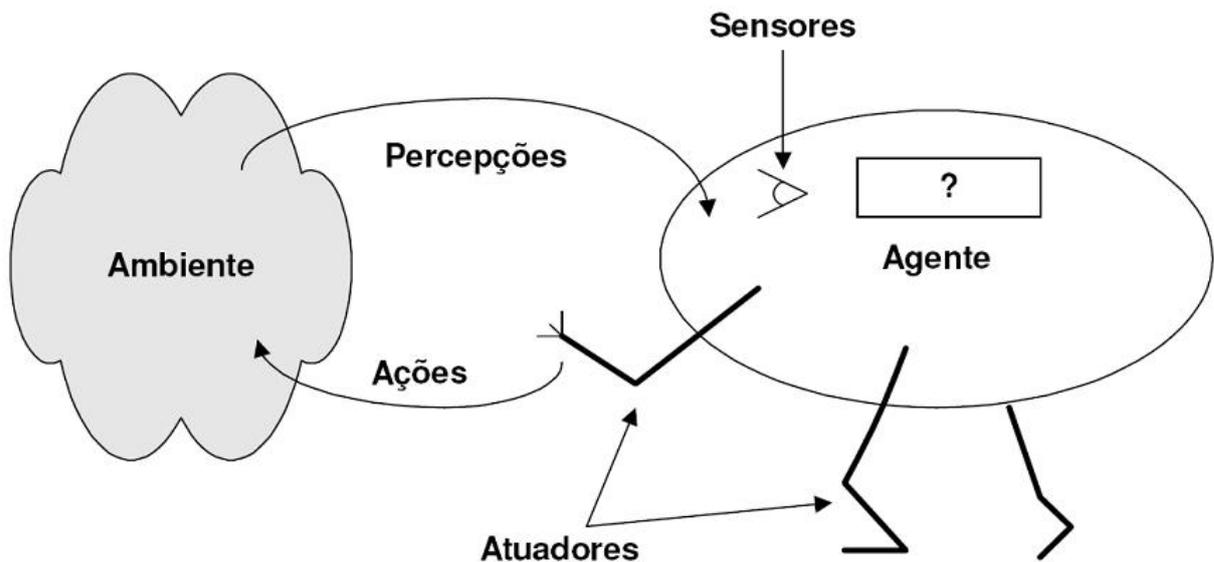


Figura 3: Estrutura básica de um agente (RUSSELL; NORVIG, 1995)

Apesar do fato de agentes poderem ser considerados o tema central do estudo da IA, até a década de 1980 havia um esforço relativamente pequeno da comunidade científica direcionado ao estudo de agentes inteligentes (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998). Atualmente, essa abordagem tem sido utilizada por pesquisadores em várias áreas como, por exemplo, a simulação de filas em centrais de teleatendimento (LOPES, 2007), simulação de mercados econômicos (VALADÃO, 2009) e simulação do comportamento do mosquito *Aedes aegypti* (ALMEIDA, 2007).

(JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998) observam que a evolução das linguagens orientadas a objeto (LOO) contribuiu para o desenvolvimento do estudo sobre agentes autônomos e que as LOO também são naturalmente utilizadas na computação para a criação de agentes. Entretanto, programadores que trabalham com essas linguagens podem ter dificuldade em perceber alguma novidade na ideia de agentes autônomos. (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998) esclarecem que isso acontece porque um objeto é definido como uma entidade computacional que encapsula algum estado e está apto a realizar algumas ações ou métodos e a comunicar-se por meio de troca de mensagens, mas, apesar das similaridades óbvias, há também diferenças significativas entre agentes e objetos.

Segundo (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998), uma das diferenças entre agentes e objetos é o grau autonomia. Na programação orientada a objetos (POO), o princípio do encapsulamento, ou seja, a ideia de que os objetos podem ter controle sobre seu estado interno, é uma de suas principais características. Na linguagem Java, por exemplo, isso pode ser obtido através da utilização de modificadores de acesso na declaração de variáveis de instância, que podem ser definidas como de acesso privado. Entretanto, diferente de um agente, o objeto não tem, por exemplo, controle sobre seu comportamento, pois seus métodos públicos são invocados por outro objeto (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998).

2.3.2 Sistemas Multiagentes

Segundo (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998), tradicionalmente, a pesquisa sobre sistemas compostos de múltiplos agentes é chamada de Inteligência Artificial Distribuída (IAD). Em 1980, ocorreu no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), o primeiro encontro de pesquisadores do campo da IAD. Nesse encontro, concluiu-se que a IAD não deveria se preocupar com questões de paralelismo de baixo nível, como, por exemplo, definir como distribuir processos em diferentes máquinas, ou como paralelizar certos algoritmos. Ao invés disso, a preocupação da IAD deveria ser como múltiplos agentes poderiam se coordenar eficazmente para resolver problemas de uma forma inteligente. A partir daí, o interesse pelo estudo dos agentes cresceu em todo o mundo (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998).

Os Sistemas Multiagentes representam uma das principais áreas da IAD. Com o passar do tempo, esse termo adquiriu um sentido mais geral e tem sido utilizado para se referir a todos os tipos de sistemas compostos de múltiplos componentes autônomos (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998).

A abordagem baseada em agentes modela cada agente como um indivíduo dotado de racionalidade, de forma que possa realizar as tarefas para o qual foi construído. Quando vários agentes estão atuando em um mesmo ambiente, um padrão pode emergir como resultado da interação entre os indivíduos. Esse resultado, conhecido como comportamento emergente, é uma característica dos sistemas multiagentes e pode revelar informações importantes sobre a dinâmica do fenômeno modelado (WEISS, 2000).

2.3.3 *Simulação Baseada em Agente*

Geralmente, quando um processo requer mais eficiência e sofre alguma intervenção para melhorar, só há como verificar se esse ajuste trouxe benefícios depois de algum tempo, comparando seus novos resultados à base histórica. Verificada a necessidade de novo ajuste, o ciclo se repete até que os resultados sejam satisfatórios. Essa dinâmica pode ser morosa e consumir recursos valiosos, principalmente se os resultados dos ajustes forem negativos. Nesse contexto, as simulações se destacam como ferramentas importantes para os pesquisadores.

As simulações são utilizadas para auxiliar os mais diversos profissionais na solução de problemas de tomada de decisão e otimização de sistemas. Sua maior vantagem reside na capacidade de reproduzir eventos a um menor custo, com maior segurança e flexibilidade. A simulação possibilita o estudo de eventos cuja ocorrência real não seria possível ou até mesmo desejável, como, por exemplo, estudar o comportamento de evacuação de um prédio em chamas (MOTTA; INÁCIO; ROSA, 1999), ou as consequências de um furacão em uma determinada região.

Com o crescente avanço da computação, as simulações têm sido potencializadas e têm ajudado a direcionar melhor a aplicação dos recursos. Para ser possível realizar uma simulação, é necessário previamente construir um modelo que represente aquilo que se deseja simular. Segundo o matemático e estatístico George Box, “*essencialmente, todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis*” (BOX; DRAPER, 1987). Essa afirmação reflete a limitação dos modelos em reproduzirem fielmente eventos reais complexos com todas as suas variáveis e toda a riqueza que a realidade apresenta. Portanto, todo modelo é uma representação simplificada da realidade. Se todos os modelos são, em certa medida, limitados, por que utilizar a modelagem baseada em agentes ao invés das modelagens matemáticas tradicionais?

Em (PARUNAK; SAVIT; RIOLO, 1998), são apresentadas as similaridades e diferenças principais entre abordagens tradicionais e a abordagem baseada em agentes. Os modelos convencionais de simulação utilizam uma abordagem macroscópica, ou seja, não consideram aspectos locais, como o grau de escassez de um dado recurso. Esses modelos encontram dificuldades em capturar detalhes do ambiente e representar aspectos qualitativos, como preferências e comportamentos que, geralmente, são características individuais (ALMEIDA, 2007). Além disso, consideram um ambiente homogêneo, onde todos os indivíduos simulados possuem o mesmo padrão de comportamento médio, não capturando características individuais.

Os modelos baseados em agentes, por sua vez, adotam uma abordagem, também chamada de “*bottom-up*” (de baixo para cima), onde modela-se o indivíduo com maior riqueza de detalhes e espera-se que o resultado da interação entre os indivíduos se aproxime um pouco mais da realidade (MACAL; NORTH, 2005).

Há esforços no sentido de definir padrões e prover ferramentas para o desenvolvimento do campo das simulações baseada em agentes. Foram criadas linguagens de modelagem, como, por exemplo, a AUML (*Agent UML*), baseada na UML¹³ (HUGET, 2004). Processos de software (DINSOREANU; SALOMIE; PUSZTAI, 2002) e técnicas para melhorar a manutenção do software e aumentar a reusabilidade (LANDER, 1997) foram elaborados, como por exemplo, padrões de projeto voltados ao desenvolvimento de sistemas baseados em agentes (MAHMOUD; MAAMAR, 2006). E, na busca por melhores desempenhos das aplicações baseadas em agentes, foi proposto em (WU; SCHULZ; GAO, 2006), seguindo também uma tendência geral, o desenvolvimento de sistemas baseados em agentes que executem de forma paralela.

O paradigma da simulação baseada em agentes vem sendo utilizado para pesquisar e analisar fenômenos de diversos campos de pesquisa como a biologia, a sociologia, a economia e ecossistemas. Trata-se da utilização de modelos onde múltiplas entidades percebem e respondem aos estímulos do ambiente e, dessa forma, reproduzem certos fenômenos (SANCHEZ; LUCAS, 2002).

Em (KOHLENER et al., 2005), por exemplo, foi proposto um modelo baseado em agentes autônomos para simular o comportamento de civilizações antigas com o objetivo de auxiliar na exploração da pré-história humana. Esse modelo representou os Anasazi, os quais foram nativos americanos pré-históricos, notórios pelo estilo de suas moradias escavadas nos penhascos, que viveram ao sudoeste dos Estados Unidos e desapareceram repentinamente. Os cientistas acreditavam que esse desaparecimento repentino foi causado por uma migração motivada por escassez de alimento na região em que eles habitavam. Utilizando o modelo proposto em (KOHLENER et al., 2005), foram realizadas simulações cujos resultados foram analisados e corroborados pelos dados arqueológicos. Os resultados foram considerados satisfatórios pois lançaram luz sobre os Anasazi, mostrando que não houve escassez na região em que viviam na época do seu desaparecimento repentino. Passaram-se então a considerar aspectos sociais, políticos e religiosos como possíveis causas do seu desaparecimento repentino.

¹³A *Unified Modeling Language* (UML) é uma linguagem de modelagem não proprietária criada e amplamente utilizada para a modelagem não apenas de estrutura, comportamento e arquitetura de aplicações, mas também de processos de negócio e de estrutura de dados - <http://www.uml.org/>.

Em 2007, (LOPES, 2007) propôs uma abordagem baseada em sistemas multiagentes para simulação de filas nas centrais de teleatendimento e demonstrou que esta abordagem oferece tratamento para problemas que os modelos “clássicos” e outras abordagens não fornecem como, por exemplo, a impaciência dos clientes. Ele construiu seu simulador sobre o *Swarm Objective C*¹⁴.

Em 2009, (VALADÃO, 2009) apresentou um simulador multiagente para simular uma economia descrita por sua matriz de insumo-produto, proposta pelo economista Wassily Leontief. Essa matriz mostra quais setores participam da economia, bem como em que medida cada um se relaciona com os outros trocando insumos e capital. O trabalho concluiu que fornecedores que adotam estratégias de cooperação concedendo descontos se saem melhor na economia. Também foi observado que uma cadeia de suprimentos preliminar emerge entre os fornecedores de diferentes setores econômicos que adotam uma cooperação mútua.

(RALAMBONDRAIN; COURDIER; PAYET, 2006), observando que as simulações geram grandes volumes de dados que precisam ser coletados de forma sistemática e posteriormente analisados, propõem um conjunto de conceitos e relações que podem ser utilizadas para capturar, processar e apresentar o resultado de uma simulação utilizando sistemas multiagentes.

2.3.4 *Plataforma de Simulação Baseada em Agente*

Segundo (RAILSBACK; LYTINEN; JACKSON, 2006), o uso de modelos baseados em agentes tem crescido rapidamente e as plataformas mais utilizadas nesse segmento adotam o paradigma de “arcabouço e bibliotecas”¹⁵ e por isso podem ser estendidas. As plataformas que têm obtido sucesso são as que provêm *software* e ferramentas padronizados, mas não limitam a complexidade dos modelos que podem ser implementados por elas (RAILSBACK; LYTINEN; JACKSON, 2006).

O principal propósito de uma plataforma de simulação baseada em agentes é prover o recurso de agendamento de ações, geralmente chamado de escalonamento¹⁶, que controla quais e quando ações específicas serão executadas no tempo simulado (RAILSBACK; LYTINEN; JACKSON, 2006). Cada unidade de execução desse tempo simulado nas plataformas de simulação é geralmente chamada de *tick*. Cada modelo define sua resolução, ou seja, a

¹⁴ *Objective C* é uma linguagem de programação orientada a objetos criada por Brad Cox e Tom Love no início dos anos 80 [WIKIPEDIA, 2009].

¹⁵Do inglês “*framework*”.

¹⁶Do inglês “*scheduling*”.

quanto tempo de simulação equivale um *tick* executado.

Existem diversas ferramentas para auxiliar no desenvolvimento de modelos e simuladores baseados em agentes. Em (RAILSBACK; LYTINEN; JACKSON, 2006), é apresentada uma comparação entre cinco dessas ferramentas: o NetLogo¹⁷, o Swarm Objective C¹⁸, o Swarm Java¹⁹, o Repast²⁰ e o MASON²¹. Após seus experimentos e estudos, conclui-se que (RAILSBACK; LYTINEN; JACKSON, 2006):

- O Repast foi criado voltado, principalmente, à modelagem de cenários de domínio social;
- O MASON foi preparado para lidar com cenários de outros domínios além do domínio social. Porém o MASON foi considerado o menos maduro de todos, dispondo apenas de recursos básicos;
- O NetLogo é a plataforma mais profissional em termos de aparência e de documentação, mas provê recursos pobres para leitura e gravação de arquivos e sua habilidade para formatar e controlar os dados de saída é limitada;
- Todas as ferramentas disponibilizam geradores de números aleatórios, mas o Swarm possui uma variedade maior desses geradores; Utilizar janelas com animação da simulação é relativamente fácil em todas elas.

O Repast, em sua versão *Symphony*, foi a plataforma escolhida como base para o desenvolvimento deste trabalho. O Repast é um arcabouço gratuito de código aberto para a simulação baseada em agentes o qual possui boa documentação e uma lista de discussão ativa. Ele provê mecanismos que simplificam a criação dos modelos bem como a execução e o controle das simulações.

Outro aspecto importante do Repast é a possibilidade de modelar ambientes complexos. O Repast foi desenvolvido na linguagem Java e permite que sua base seja estendida. Além disso, está construído sobre o Eclipse²² que é um ambiente de desenvolvimento de sistemas amplamente utilizado.

¹⁷<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

¹⁸<http://www.swarm.org/>

¹⁹<http://www.swarm.org/>

²⁰<http://repast.sourceforge.net/>

²¹<http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>

²²Eclipse é uma comunidade de código livre, suportada por grandes empresas, universidades, instituições de pesquisa e pesquisadores voluntários, cujos projetos são focados na construção de uma plataforma de desenvolvimento composta de *frameworks* extensíveis - <http://www.eclipse.org/>.

O Repast tem sido utilizado como base para construção de modelos e simuladores em pesquisas como, por exemplo, (ALMEIDA, 2007) que utilizou o Repast para criar um arcabouço de simulação sobre o qual modelou o comportamento do mosquito transmissor da Dengue, *Aedes aegypti*, utilizando a abordagem baseada em agentes.

Outros exemplos de utilização do Repast podem ser citados. (TENG; KONG, 2008) propuseram um simulador de filas de transplante de fígado baseado no Repast e (VALADÃO, 2009) utilizou o Repast para a construção de um simulador baseado em agentes de uma economia descrita por sua matriz de insumo-produto.

2.4 Simulação de Filas de Transplantes

Segundo (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998), as aplicações médicas têm ocupado um grande espaço na ciência da computação. Frequentemente, surgem novos sistemas que aplicam a computação na área da saúde.

Em (HOWARD, 2001), por exemplo, o autor emprega um modelo de simulação para estudar como a saúde dos pacientes se altera desde a entrada na fila até o transplante em função da escassez e da razão entre a demanda e a oferta de fígado. (HOWARD, 2001) concluiu que, comparada à política *PEPS* ou à *aleatória*, a política do pior primeiro tem um resultado pior para os pacientes quando a razão *demanda-suprimento* é alta. Segundo (HOWARD, 2001), uma parcela desse diferencial pode ser atribuída ao fato de que, na política *pior-primeiro*, muitos pacientes entram na fila em um estado não-urgente mas só são transplantados quando alcançam uma categoria de urgência. Entretanto, essa política é equitativa para aqueles pacientes inscritos na lista de espera na categoria urgente que não ficam em desvantagem em relação aos pacientes nos estados mais saudáveis que foram inscritos na fila há mais tempo.

Ainda segundo (HOWARD, 2001), os argumentos que apoiam a política do pior-primeiro geralmente se baseiam no conceito de justiça e no “princípio do resgate”, ou seja, o princípio de que recursos médicos escassos devem ser devotados a pacientes com a menor expectativa de vida sem o tratamento. Entretanto, uma regra que prioriza os pacientes mais doentes fará com que mais pacientes piorem enquanto esperam pelo tratamento.

(HOWARD, 2001) também ressalta que exemplos simples nos quais os pacientes são classificados como “urgente” e “não urgente” são incapazes de capturar completamente a natureza dinâmica do problema. Uma descrição completa de uma fila de espera deve considerar não apenas o nível atual de saúde do paciente, mas também como sua saúde

varia com o tempo e como a disponibilidade de tratamento influencia o tempo de espera.

No caso de transplante de fígado, (HOWARD, 2001) afirma que foi mostrado que o aumento do tempo de espera está associado (estatisticamente e clinicamente) ao aumento do risco de resultados adversos, sugerindo que regras de racionamento que reduzam o tempo de espera podem melhorar a taxa de sobrevivência (HOWARD, 2001). (HOWARD, 2001) também relatou que em uma pesquisa utilizando um modelo de alocação de fígado e dados de um hospital britânico para calcular o custo de várias regras de alocação, foi concluído que uma regra “melhor-primeiro” é a política de melhor relação custo-benefício.

A principal conclusão de (HOWARD, 2001) é que a regra do “pior-primeiro” é equitativa, mas sua eficiência, medida em termos de perda de saúde dos pacientes ocorrida entre o ingresso na fila de espera e o transplante, diminui na medida em que a razão entre demanda-oferta aumenta. No simulador proposto em (HOWARD, 2001), as taxas de chegada de pacientes e fígados foram modeladas seguindo uma distribuição de Poisson e os pacientes são colocados na fila de espera em um de 3 níveis de saúde, os quais correspondem às categorias de gravidade usadas pelo UNOS²³ (*United Network for Organ Sharing: Organ Donation and Transplantation*) que é uma organização americana de apoio e monitoramento dos transplantes.

Em 2004, (THOMPSON et al., 2004) apresentaram uma ferramenta denominada LSAM (*Liver Simulated Allocation Model*) capaz de simular vários aspectos de uma fila de transplantes de fígado como as políticas de alocação. Segundo o artigo, a mudança da política de prioridade para o MELD foi motivada por haver mais pacientes que fígados disponíveis e, dessa forma, antes da utilização do MELD, apenas aqueles pacientes que estivessem suficientemente saudáveis para sobreviver até chegarem ao início da fila conseguiam receber um órgão.

Com a necessidade de melhoria no processo de alocação de órgãos, a comunidade médica se viu diante de uma variedade de pontos a serem considerados que precisariam ser estudados em uma simulação. Segundo (THOMPSON et al., 2004), isso criou a necessidade de desenvolver simuladores que possuíssem certas características:

- Permitir aos investigadores explorar um largo espectro de políticas;
- Permitir que fossem estendidos e que novas políticas pudessem ser definidas sem a necessidade de programação;

²³<http://www.unos.org/>

- Permitir que partes da simulação pudessem ser modelados externamente e carregados como parâmetros;
- Permitir ser confrontados com dados históricos e futuros;
- Proporcionar baixo custo, rapidez e que não fossem dependentes de pacotes proprietários;
- Estar disponível a outros pesquisadores da comunidade de transplantes.

No LSAM (THOMPSON et al., 2004), os modelos estão separados em dois componentes. Um dos componentes é responsável pela criação e alocação dos pacientes na fila de espera e também da criação dos órgãos. O outro componente representa as políticas que alocam os fígados disponíveis aos pacientes na fila. O modelo gera sequências de números pseudo-aleatórios para gerar processos aleatórios e segue na sequência de eventos discretos. Os usuários do LSAM podem gerar chegadas de pacientes a partir de dados históricos, por exemplo. Além disso, o LSAM permite que os pacientes simulados cujos transplantes falharam possam voltar à fila de espera. O LSAM também provê recursos para adicionar novos campos definidos pelo usuário e referenciá-los na definição das políticas de alocação.

A simulação proposta em (THOMPSON et al., 2004) utilizou dados dos pacientes na fila de espera no ano de 1999 e simulou as atividades no período de 01/01/99 a 31/12/99. Os dados históricos continham as alterações de estado de saúde e datas de óbito dos pacientes. Após a análise dos resultados, (THOMPSON et al., 2004) perceberam que a maior discrepância do modelo confrontado com a realidade foi quanto à mortalidade na lista de espera, o qual foi maior no simulador que a real.

Acompanhando a aplicação da computação no campo da saúde, não é de se surpreender que também a abordagem baseada em agentes tenha sua aplicação nesse domínio (JENNINGS; SYCARA; WOOLDRIDGE, 1998). Segundo (TENG; KONG, 2008), modelos de simulação foram desenvolvidos no passado para avaliar as políticas de transplantes. Entretanto, nenhum deles utilizou uma abordagem multiagente, que seria a indicada para a modelagem da evolução da organização de comportamentos.

Em 2008, (TENG; KONG, 2008) apresentaram a proposta de implementação de um simulador baseado em agentes de fila de transplante de fígados, descrevendo ideias e apresentando algumas decisões de projeto. Entretanto, o artigo não apresenta nenhum resultado e esclarece que o simulador, até então, não havia sido calibrado e validado. Segundo (TENG; KONG, 2008), a alocação de um órgão a um paciente é um processo de tomada de decisão complexo.

(TENG; KONG, 2008) apresentaram uma simulação cujo início reproduz o estado da fila em 01/01/2004. As saídas observadas foram o tamanho médio da fila, o tempo de espera médio, o número de órgãos perdidos, os óbitos na fila de espera, as taxas de sobrevivência do enxerto e a taxa de sobrevivência dos pacientes. O simulador foi implementado sobre o Repast Symphony 1.1. Nele, cinco tipos de agentes foram implementados: *Model Initializer*, *Organ-Patient Generator*, *Organ* e *OPO*²⁴ (Organização de Procura de Órgãos). No início da execução, o *Model Initializer* gera 58 OPOs e as dispõe em um espaço contínuo representando sua localização geográfica real, a *Region Network* é gerada ligando as OPOs na mesma região e o *Organ-Patient Generator* gera a fila de pacientes em 01/01/2004.

O simulador proposto em (TENG; KONG, 2008) implementa a política de progressão do MELD de 1, 0 ou -1. Assim como em (HOWARD, 2001), a taxa de chegada dos pacientes e dos fígados são modeladas como processos de Poisson com o valor da taxa de chegada anual média como valor central. Quando um paciente é gerado, são atribuídos a ele o tipo sanguíneo, o OPO e o MELD, cujos valores são baseados em uma distribuição empírica porque assumem que os dados não possuem correlação principalmente por causa da escassez dos dados. (TENG; KONG, 2008) também ressaltam que o tempo de isquemia do órgão pode ser utilizado como um preditor de sobrevida do paciente no pós-transplante.

²⁴Do inglês “*Organ Procurement Organization*”.

3 SIMULAÇÃO DE UMA FILA DE TRANSPLANTES DE FÍGADO

O modelo de simulação proposto neste trabalho representa as filas de transplantes de fígado utilizando um paradigma baseado em agentes. Dessa forma, o modelo representa, individualmente, cada paciente receptor e a doença que o acomete, cada fígado doado, o sistema de filas e as interações entre eles. Os agentes tomam suas decisões e interagem com outros agentes e entidades, segundo suas necessidades específicas e de acordo com seus objetivos.

Os comportamentos e interações foram modelados em uma granularidade fina, pois foi considerado o agente. Essa abordagem de modelagem faz com que o funcionamento geral do sistema se aproxime do comportamento real. O conjunto de agentes e entidades com suas características representam os componentes do modelo para simular o funcionamento da fila de transplantes. Durante a simulação, as ações desses componentes, bem como a interação entre eles, representam situações que acontecem no processo real de transplantes de fígado.

Este paradigma de modelagem apresenta desafios que foram encontrados quanto à modelagem dos agentes, como, por exemplo, simular o impacto distinto de cada doença na saúde do paciente.

O objetivo do modelo de simulação proposto é demonstrar a viabilidade da abordagem baseada em sistemas multiagentes para simulação das filas de transplante de fígado.

Este capítulo apresenta, na seção 3.1, a visão geral do modelo, considerações, decisões de projeto, uma visão geral do processo modelado e os agentes e principais entidades envolvidos no processo.

Na seção 3.2, a dinâmica da simulação é apresentada respeitando a ordem de execução imposta ao simulador, bem como o comportamento dos tipos de agente envolvidos em cada momento.

Na seção 3.3, é apresentado o modelo de *software* do simulador.

3.1 Visão Geral do Modelo

Esta seção apresenta uma visão geral do modelo, buscando introduzi-lo, delimitar seu escopo, apresentar seus agentes e entidades e localizá-lo no processo de transplantes descrito na subseção 2.2.2.

Para permitir uma visão geral do modelo, algumas considerações a respeito do modelo são apresentadas a seguir:

- O modelo busca reproduzir o processo de transplante de fígado descrito em 2.2.2 a partir do momento em que o órgão já está disponível para o transplante até o acompanhamento dos pacientes no pós-transplante.
- Com exceção dos fígados e pacientes¹, o modelo considera juntas médicas, materiais, equipamentos, salas de cirurgia, hospitais e tudo mais necessário ao transplante, como recursos disponíveis e sem restrição.
- Embora atualmente já existam técnicas para a divisão de um fígado doado para transplantar ao mesmo tempo dois pacientes, geralmente um adulto e uma criança, este modelo considera que um fígado atende apenas um paciente.
- Neste modelo, foram considerados apenas pacientes adultos. É interessante ressaltar que o índice de gravidade utilizado para as crianças não é o MELD mas o PELD² (*Pediatric End-Stage Liver Disease*) (FREEMAN et al., 2002).
- Neste modelo, um *tick* representa um dia de simulação.

Considerando os elementos básicos que descrevem um sistema de filas, destacados em (GROSS; HARRIS, 1998) e apresentados na seção 2.1, a implementação adotada pelo modelo é apresentada a seguir:

- Padrão de chegada dos clientes: o padrão de chegada de pacientes e fígados no sistema de filas é representado pela distribuição de Poisson;
- Padrão de atendimento dos servidores: cada serviço atende um paciente e o tempo de serviço é pré-determinado e igual para todos os serviços;

¹Os pacientes poderiam ser considerados recursos escassos caso, em um cenário hipotético, houvesse maior oferta de fígados que chegada de pacientes na fila e o objetivo fosse diminuir o desperdício de órgãos doados, por exemplo.

²Segundo (Ministério da Saúde, 2006b), o PELD pode ser harmonizado com o MELD a partir da fórmula: $PELD = \lfloor 3 \times MELD + 0,5 \rfloor$.

- Disciplina da fila: as disciplinas implementadas foram: *pior-primeiro*, *melhor-primeiro*, *PEPS* e *aleatório*;
- Capacidade do sistema: o sistema possui capacidade infinita, ou seja, não há restrição quanto ao tamanho da fila de espera. Ela é capaz de receber uma quantidade infinita de pacientes;
- Número de canais de atendimento: Uma vez que toda a estrutura necessária ao transplante não é considerada recurso escasso, não há restrição na quantidade simultânea de serviços;
- Número de estágios do serviço: o serviço (transplante) é realizado em apenas um estágio.

Pode-se considerar que o processo modelado começa quando um *paciente* é inscrito na *fila de espera*. Enquanto esse *paciente* aguarda pela doação de um *fígado* que lhe seja compatível, sua saúde se altera em função da ação, em seu organismo, da *doença* que o acomete.

Durante esse período de espera, o *paciente* corre o risco de *falecer* devido ao seu estado de saúde comprometido, mas tem uma pequena chance de recuperar sua função hepática, apresentar uma *melhora* e não precisar mais de um transplante.

Nesse tempo de espera na *fila*, pode ser que o *paciente* prefira tentar uma transferência para filas de outros estados, desista de ser transplantado ou, simplesmente, perca o contato com a Central de Transplantes por um motivo qualquer, configurando *abandono* da fila.

Quando um *fígado* se torna disponível, há um esforço para alocá-lo a um *paciente* que atenda os critérios de *compatibilidade*, respeitando a sua *posição na fila*. Os critérios de compatibilidade consideram o *tipo sanguíneo* e os *tamanhos* do doador, representado pelo fígado, e do receptor. A posição do *paciente* na *fila*, por sua vez, dependerá da *disciplina* adotada, que pode ser a ordem natural de *chegada*, uma ordem *aleatória*, o *pior-primeiro* ou o *melhor-primeiro*.

Encontrado o primeiro *paciente* compatível, o *serviço* é iniciado, momento em que o *fígado* doado é transplantado para o *paciente*. Após o transplante, o *paciente* transplantado passa ao *acompanhamento pós-transplante* onde pode ficar pelo período de até um ano.

Durante o *acompanhamento pós-transplante*, o *paciente* pode vir a falecer ou sofrer de rejeição ao enxerto e retornar à *fila* por necessitar de um novo transplante.

A dinâmica do modelo descrita nesta seção, pode ser observada no esquema apresentado pela figura 4.

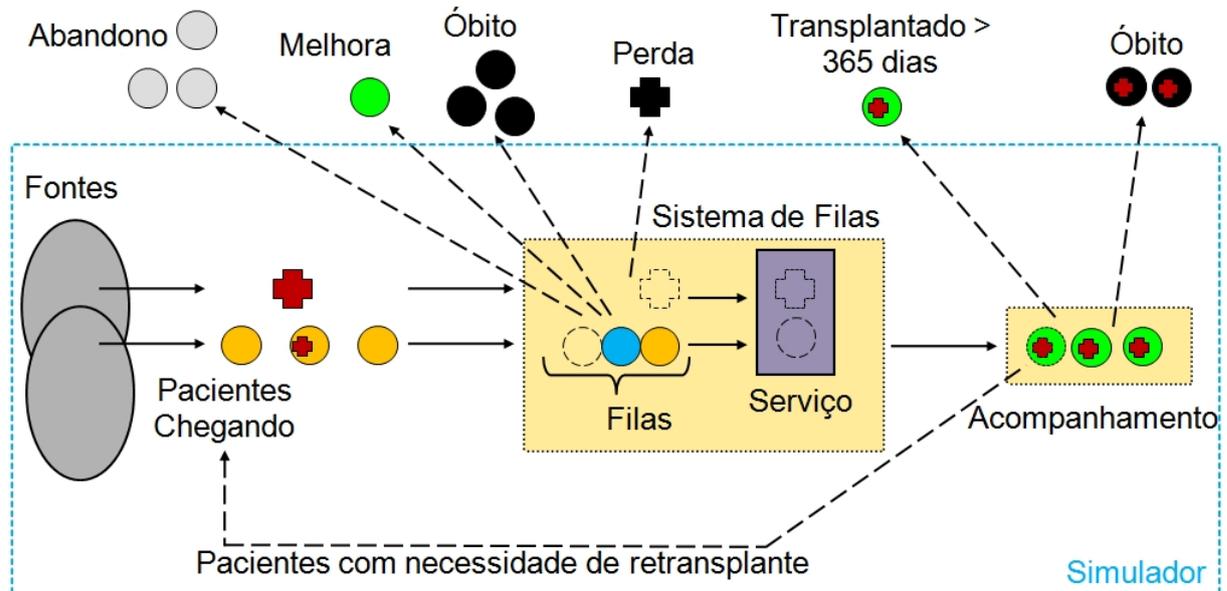


Figura 4: Esquema da dinâmica do modelo de simulação [DADOS DA PESQUISA].

As entidades do modelo envolvidas nesse processo são:

- *Paciente*: agente que representa o paciente receptor;
- *Fígado*: agente que representa o fígado doado;
- *Disciplina*: entidade que define a política de ordenação da fila de transplantes;
- *Fonte*: agente responsável pela geração e inscrição dos elementos nas filas. Neste modelo, foram definidos dois tipos de fontes: a fonte de pacientes e a fonte de fígados;
- *Serviço*: agente que representa a cirurgia de transplante, onde o fígado doado é transplantado para o paciente receptor;
- *Sistema de Filas*: agente responsável pelo controle de entrada e de saída de elementos na fila, pela aplicação da disciplina na fila de espera, verificação dos critérios de compatibilidade, pela alocação *fígado-paciente* e a criação dos serviços;

- *Acompanhamento Pós-transplante*: agente responsável por manter na simulação os pacientes transplantados e acompanhá-los por um período de até um ano. Também é responsável por retirar da simulação aqueles pacientes que faleceram no pós-transplante e inscrever novamente na fila de espera aqueles que tiveram problemas com o enxerto;
- *Doença*: entidade responsável pela evolução do MELD do paciente;
- *Relatório*: entidade responsável por contabilizar e gravar em arquivo o resultado dos indicadores da simulação.

3.2 Dinâmica da Simulação

Nesta seção, será descrita a execução de um *tick* buscando apresentar a dinâmica da simulação do processo modelado descrito na seção 3.1 e a interação entre os agentes em um dia de simulação. Neste contexto, o valor de um *tick* representa um dia na simulação.

É importante ressaltar que a ordem de execução apresentada nesta subseção não segue o fluxo do processo apresentado na seção 3.1. A ordem apresentada aqui foi imposta à simulação para evitar que os pacientes pudessem passar por todo o ciclo em apenas um *tick*. Isso não deve acontecer porque todas as ações realizadas em um *tick* representam eventos simultâneos no mundo real. Para ilustrar o problema, pode-se imaginar o que poderia acontecer em apenas um *tick* considerando uma ordem hipotética:

1. A *fonte de pacientes* cria um paciente e o inscreve na fila;
2. A *fonte de fígados* cria um fígado e o disponibiliza para transplante;
3. O *sistema de filas* aloca o fígado doado ao paciente e cria um serviço;
4. O *serviço* realiza o transplante e encaminha o paciente ao acompanhamento pós-transplante;
5. O *paciente* tem problemas com o enxerto e adoece novamente;
6. O *acompanhamento pós-transplante* reinscreve o paciente na fila de espera como “doente novamente”.

Lembrando que um *tick* representa um dia na simulação, nesse exemplo, o paciente chegaria na fila em um dia e, ao final do mesmo dia, já estaria na fila de espera com um

fígado transplantado rejeitado. Dessa forma, o paciente teria passado por situações que, no mundo real, aconteceriam simultaneamente.

3.2.1 *Sistema de Filas, Serviço e Acompanhamento pós-transplante*

Na simulação executada sobre o modelo, um dia simulado (*tick*) começa com as atividades do *sistema de filas* e do *acompanhamento pós-transplante*.

O *sistema de filas* organiza a *fila de espera* e, nesse momento, as inscrições dos pacientes que deixaram a fila porque melhoraram, faleceram ou abandonaram o sistema são canceladas e a quantidade de cada um desses tipos de evento é incrementada na classe *Relatório* para estatísticas e registro nos arquivos de saída (*logs* de execução).

Então, o *sistema de filas* organiza a *fila de fígados* e todos os órgãos que estão no estado “sem utilidade”, ou seja, aguardando um receptor há mais de um dia, são considerados inadequados para o transplante e descartados.

Organizadas as filas, se houver fígados disponíveis, é verificada a compatibilidade de cada órgão, conforme sua ordem de chegada, com os pacientes que estão na *fila de espera* respeitando a *disciplina* adotada.

Neste modelo, a compatibilidade é baseada em duas propriedades: tamanho e tipo sanguíneo do paciente e do doador, mas o modelo poderia ser alterado para utilizar outros critérios. Dessa forma, para realizar a alocação *fígado-paciente*, o *sistema de filas* verifica a compatibilidade entre órgão doado e paciente receptor, comparando seus atributos “tamanho” e “tipo sanguíneo”.

No processo real, a compatibilidade por “tamanho” é verificada considerando um percentual do peso dos pacientes doador e receptor dentro de uma margem de diferença. Neste modelo, foi considerado que, para haver compatibilidade entre órgão doado e paciente receptor quanto ao “tamanho”, o “tamanho” do *fígado* e do *paciente* deve ser o mesmo.

A compatibilidade por “tipo sanguíneo” baseia-se na matriz apresentada pela tabela 1, onde uma marca (X) indica que há relacionamento entre doador e receptor para aquele tipo sanguíneo.

Para cada par *fígado-paciente* encontrado, um *serviço* é criado pelo *sistema de filas* e encerram-se as suas atividades até o próximo *tick*.

Cada *serviço* realiza um transplante. No transplante, um fígado é associado a

Tabela 1: Compatibilidade por tipo sanguíneo

Receptor	Doador							
	O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+
O-	X	X						
O+	X	X						
A-	X	X	X	X				
A+	X	X	X	X				
B-	X	X			X	X		
B+	X	X			X	X		
AB-	X	X	X	X	X	X	X	X
AB+	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: (AMERICAN RED CROSS,) (WIKIPEDIA,)

um paciente. Ao final do *serviço*, o *fígado* implantado passa do estado “útil” ao estado “utilizado”. O *paciente* que o recebeu passa do estado “doente” ao estado “transplantado” ou do estado “doente novamente” ao estado “retransplantado” e é então encaminhado ao *Acompanhamento pós-transplante*, onde será acompanhado por um período de até um ano. Nesse momento, a quantidade de transplantes e retransplantes são incrementadas na *Relatório*.

O *Acompanhamento pós-transplante* organiza a relação de pacientes transplantados e ainda acompanhados, verificando, contabilizando e removendo da simulação aqueles pacientes que completaram um ano de acompanhamento, que faleceram, ou que tornaram a adoecer (que se encontram no estado “Doente novamente”) e voltaram a necessitar de um transplante. Esses últimos são novamente inscritos na *fila de espera*.

3.2.2 O Paciente

O paciente pode assumir diferentes estados: “doente”, “doente novamente”, “transplantado”, “retransplantado”, “curado” e “falecido”. A figura 5 apresenta os estados do paciente bem como o eventos que provocam a transição entre esses estados.

O estado em que o paciente se encontra define seu comportamento. Nesta subseção, cada comportamento do paciente é descrito em função do seu estado.

3.2.2.1 “Doente” e “Doente novamente”

Todo *paciente* é criado pela *fonte de pacientes* no estado “doente”. Um paciente passa ao estado “doente novamente”, quando, ainda no *acompanhamento pós-transplante*,

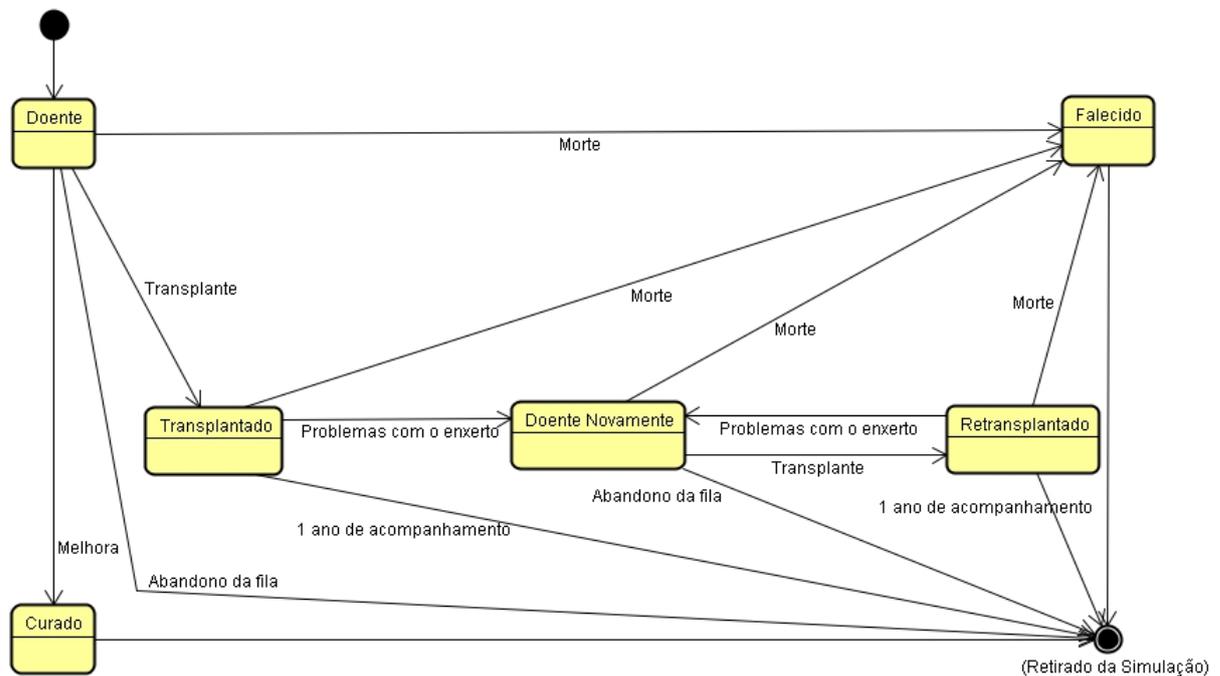


Figura 5: Diagrama de transição de estados do paciente

volta a necessitar de um transplante.

Em um destes estados, se o *paciente* ainda não tem uma *data prevista de falecimento*, avaliará, em função do seu índice MELD, se irá falecer nos próximos 90 dias. Em caso positivo, um dia (*tick*) será aleatoriamente escolhido, dentre os próximos noventa, para ser sua *data prevista de falecimento*. Essa *data prevista de falecimento* será sua data limite para o transplante, pois, caso seja alcançada pela simulação, estando o *paciente* ainda à espera de um transplante, ele falecerá passando ao estado “falecido” e sendo posteriormente retirado da simulação pelo *sistema de filas*, conforme descrito na subseção 3.2.1.

Após essas verificações, apenas se ele estiver no estado “doente”, terá uma chance de melhorar e, se isso ocorrer, ele melhora e passa ao estado “curado”.

Então, cada paciente que permanecer no estado “doente” ou “doente novamente” tem o valor do seu MELD atualizado em função da evolução da doença que o acomete.

Depois dessas etapas, o *paciente* verifica se é o momento de morrer comparando sua *data prevista de falecimento*, se ela estiver preenchida, com a data atual. Se essas datas forem iguais, o *paciente* morre, passando ao estado “falecido”.

3.2.2.2 “Transplantado” ou “Retransplantado”

O paciente em um destes estados encontra-se em período de acompanhamento no *acompanhamento pós-transplante*. Nestes estados, o *paciente* avalia o risco de morte e, probabilisticamente, morre. Se não morrer, avalia o risco de falha do enxerto e, se for o caso, passa ao estado “doente novamente”. Passando a esse estado, adquire uma doença chamada neste modelo de “*Rejeição Genérica do Enxerto*”.

3.2.2.3 “Curado” ou “Falecido”

O paciente no estado “curado” é aquele que, durante o período de espera na *fila*, recuperou sua função hepática e *melhorou*. Já o paciente em estado “falecido” é aquele que, esperando na *fila* ou no *acompanhamento pós-transplante*, veio a falecer.

Os pacientes nestes estados não realizam atividade alguma e serão retirados da *fila de espera* ou do *acompanhamento pós-transplante* na próxima vez que esses agentes se organizarem, conforme descrito na subseção 3.2.1.

3.2.3 *O Fígado*

Assim como o paciente, o agente *fígado* pode assumir diferentes estados: “útil”, “sem utilidade” e “utilizado”. Seu estado define seu comportamento. Nesta subseção, o comportamento do *fígado* é descrito em função do seu estado.

Caso exista algum *fígado* disponível para transplante, ele estará neste estado. Um *fígado* no estado “útil” é um órgão em bom estado e precisa ser transplantado o quanto antes para um paciente receptor. Caso contrário, não poderá mais ser utilizado.

Cada *fígado* no estado “útil” verifica e atualiza seu período de validade e se tiver expirado, passa ao estado “sem utilidade”.

Um *fígado* no estado “sem utilidade” é retirado da simulação na próxima atuação do *sistema de filas*, conforme descrito na subseção 3.2.1.

Quando um *fígado* no estado “útil” é transplantado em um paciente, ele passa ao estado “utilizado”. Até o momento, neste estado, o *fígado* não tem ação alguma. Ele simplesmente acompanha o *paciente* que o recebeu.

tamento e tomada de decisão. Os valores probabilísticos utilizados neste trabalho foram obtidos partir da análise de bases de dados históricas e também definidos arbitrariamente. Esses valores são descritos na seção 4.1.3 e suas origens na subseção 4.1.2.

Nas subseções que se seguem, cada agente e entidade serão apresentados com seus atributos e valores válidos.

3.3.1 Doença

A classe abstrata *Disease* representa o comportamento comum a todas as doenças que podem acometer o paciente neste modelo. Uma doença tem um atributo bônus (*bonus*) o qual poderá conter um valor passado como parâmetro pelo usuário do sistema. O bônus é um valor de correção que é acrescentado ao MELD do paciente de acordo com sua doença, pois alguns tipos de doença, como por exemplo, carcinomas, comprometem rapidamente a saúde do paciente trazendo ainda maior urgência à necessidade de transplante.

Os tipos de doença implementados pelo modelo são: *Cirroze etanólica*, *Cirroze pós-viral B e C*, *Cirroze criptogênica*, *Carcinoma Hepatocelular* e *Outras*. Esses tipos compõem uma amostra que representa as doenças que podem levar um paciente à fila de transplante. Além dessas, é implementada uma doença, chamada aqui de *Rejeição Genérica do Enxerto*, que acomete os pacientes transplantados que têm problemas após a cirurgia e voltam a precisar de um transplante.

No modelo, cada um dos tipos de doença é uma implementação concreta de *Disease*. Dessa forma, o método *getHealthTransition()*, responsável por definir a evolução do MELD do paciente, é definido em *Disease*, mas se comporta conforme a implementação da doença de cada paciente⁴. Esse desenho permite que cada doença cause um impacto distinto na evolução do MELD do paciente e permite que um nível maior de detalhe seja alcançado pelo modelo posteriormente.

Essa possibilidade de reproduzir como a saúde do paciente varia com o tempo, segundo (HOWARD, 2001), é importante para capturar melhor a natureza dinâmica do problema. Os atributos da classe *Disease* são:

- *name*: armazena o nome da doença;
- *bonus*: armazena o bônus por “situação especial”. Algumas doenças aumentam a

⁴No desenvolvimento Orientado a Objetos, essa técnica é conhecida por “Polimorfismo”.

urgência de um transplante do paciente. O valor do MELD do paciente é igual ao maior dos dois valores: MELD e bônus. Dessa forma, o índice MELD do paciente pode ser obtido a partir da função $\max(MELD, bônus)$;

- *evolutionDistribution*: representa distribuição estatística utilizada para a geração de números aleatórios que define a evolução do MELD do paciente.

O método da classe *Disease* mais relevante para o modelo é o *getHealthTransition()*. Esse método representa a evolução da doença, sendo responsável pelo aumento do MELD do paciente.

Modelo de classes relacionado às doenças, é apresentado pela figura 7.

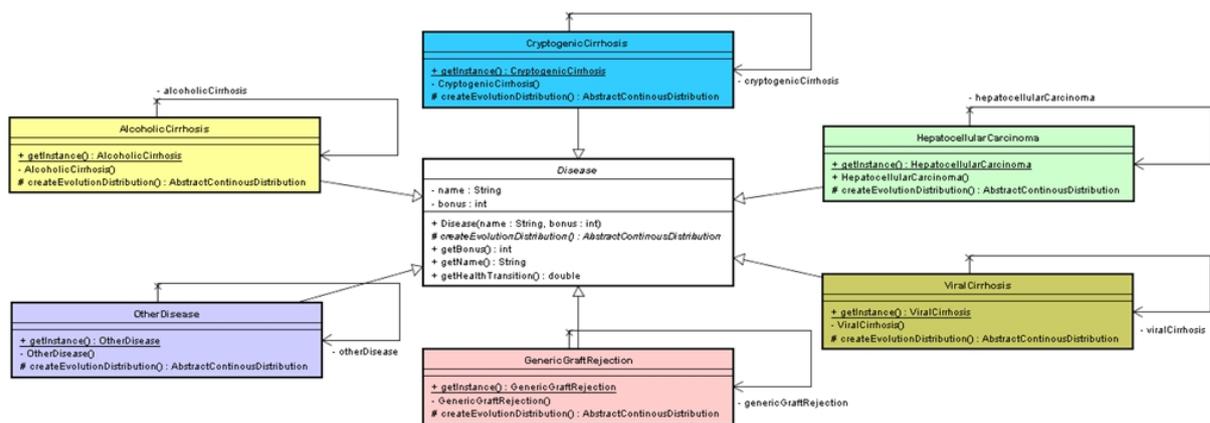


Figura 7: Diagrama de classes das doenças

Durante este trabalho, não foram encontradas informações sobre o impacto de cada doença no valor do MELD dos pacientes. Portanto, neste modelo, todas as doenças evoluem da mesma forma e aumentam o valor do MELD do paciente em um número aleatório entre 0 e 1 a cada *tick*.

3.3.2 Paciente

Patient é a classe que implementa o agente *Paciente*. Suas principais propriedades são:

- *randomId*: um número aleatório inteiro utilizado para a ordenação da fila na política *aleatória*;
- *id*: um número sequencial inteiro que serve como identificador do paciente;

- *joinTick*: *tick* em que o paciente foi inscrito na fila de espera;
- *leaveTick*: *tick* em que o paciente deixou a fila de espera. Junto com o atributo *joinTick* é utilizado para o cálculo do tempo de espera na fila;
- *sex*: indica o sexo do paciente. Seus valores podem ser “M” ou “F” representando os sexos masculino e feminino, respectivamente;
- *bloodType*: representa o tipo sanguíneo e pode assumir os valores *ON* (O-), *O* (O+), *AN* (A-), *A* (A+), *BN* (B-), *B* (B+), *ABN* (AB-), *AB* (AB+);
- *size*: representa o tamanho do paciente. Pode receber os valores *Pequeno*, *Médio* e *Grande*;
- *meld*: representa o MELD do paciente e pode assumir valores de 6 a 50;
- *disease*: representa a doença que acomete o paciente;
- *liver*: representa o fígado do paciente transplantado;
- *patientState*: representa o estado do paciente o qual pode ser *doente*, *transplantado*, *doente novamente*, *retransplantado*, *curado* e *falecido*;
- *deathDay*: armazena quando o paciente deverá falecer se não for transplantado;
- *transplantationTick*: guarda o momento (*tick*) em que o transplante foi realizado. É utilizado cálculo de um ano durante o acompanhamento pós-transplante.

Seus principais métodos são:

- *myStep()*: Método, invocado a cada *tick*, responsável por orquestrar o comportamento e as decisões deste tipo de agente.
- *healthEvaluate()*: Método pelo qual o paciente avalia, baseado em seu MELD, se irá falecer nos próximos 90 dias. Se positivo, escolherá aleatoriamente um dia dentre os próximos noventa e carregará o seu valor em seu atributo *deathDay* (dia de falecimento).
- *healthTransition()*: Método responsável por atualizar o valor do MELD do paciente em função da evolução da sua doença.
- *evaluateHepaticFunction()*: Método responsável por avaliar a função hepática do paciente e decidir se ele deve melhorar ou não.

- *die()*: Método responsável pela morte do paciente. É invocado quando o agente paciente decide que é o momento de morrer.
- *couldReceive(Liver liver)*: Método pelo qual a compatibilidade do paciente com o fígado doado é verificada. Essa é, na realidade, uma atribuição do médico do paciente, mas aqui foi implementada no paciente por simplificação.
- *receiveLiver(Liver liver)*: Método pelo qual o paciente recebe o novo órgão.

3.3.3 Fígado

O agente *fígado* representa o órgão (fígado) doado para transplante. No contexto de transplantes, é também chamado pela literatura de “enxerto”.

A classe *Liver* implementa o agente *fígado* e possui os atributos:

- *id*: Um número sequencial inteiro que serve como identificador do fígado.
- *joinTick*: *tick* em que o fígado foi chegou no sistema;
- *leaveTick*: *tick* em que o fígado deixou o sistema por perda da validade;
- *bloodType*: representa o tipo sanguíneo;
- *size*: representa o tamanho do paciente doador. Pode receber os valores *Pequeno*, *Médio* e *Grande*;
- *liverState*: representa o estado do fígado o qual pode ser *útil*, *sem utilidade*, *utilizado*;
- *validity*: define o prazo de validade do fígado.

Dentre esses atributos, *bloodType* e *size* são os atributos utilizados como critérios de compatibilidade para o transplante. O critérios de compatibilidade são descritos na subseção 3.2.1.

De forma semelhante ao agente paciente, o método *myStep()* define o seu comportamento que é definido pelos seus possíveis estados, conforme descrito na subseção 3.2.3.

3.3.4 *Disciplina*

A classe *Discipline* representa a *disciplina* definida para a fila de pacientes, sendo responsável pela comparação entre os pacientes conforme a política definida. Baseado em (HOWARD, 2001), ela pode assumir os valores FCFS (*First-Come First-Served*), SFPR (*Sickest-First Priority Rule*), HFPR (*Healthiest-First Priority Rule*) e SIRO (*Service In Random Order*) representando as disciplinas *PEPS*, *pior-primeiro*, *melhor-primeiro* e *aleatório*, respectivamente.

As políticas baseadas na gravidade da doença, ou seja, *pior-primeiro* e *melhor-primeiro*, consideram o MELD do paciente para ordenação dos pacientes na fila de espera.

No Java, a *interface Comparator*⁵ é utilizada para conformar uma classe ao padrão de um *comparador* reconhecido pelo compilador. Um *comparador* permite a comparação de dois determinados objetos, *object1* e *object2*, e é utilizado para a ordenação de coleções e estruturas de dados como uma lista de objetos, por exemplo.

Se uma classe implementa essa *interface*, ela é obrigada a implementar o método *compare(Object object1, Object object2)* o qual será utilizado pelo compilador para comparar o *object1* com o *object2* quanto à precedência entre eles. Como a *interface Comparator* suporta *generics*⁶, a classe *Disease* implementa a *interface Comparator<Patient>* e implementa o método *compare(Patient element1, Patient element2)*, o qual é capaz de comparar os pacientes permitindo a ordenação da fila segundo a política definida pelo usuário.

3.3.5 *Fonte*

O agente *fonte* representa a fonte, ou seja, a fábrica de elementos, sendo responsável por criá-los segundo uma distribuição de Poisson. No momento da criação de um elemento, a *fonte* fornece valores a algumas de suas propriedades. Uma vez que os elementos foram criados e caracterizados com informações iniciais, a *fonte* os envia ao sistema de filas. Há dois agentes desse tipo: a *fonte de pacientes* e a *fonte de fígados* responsáveis pela criação dos pacientes e fígados, implementados pelas classes *PatientSource* e *LiverSource*, respectivamente.

As classes *PatientSource* e *LiverSource* são subclasses da classe *SimpleSource* a

⁵Mais informações sobre a *interface Comparator* podem ser obtidas em <http://java.sun.com/javase/6/docs/api/java/util/Comparator.html>.

⁶Mais informações sobre *generics* podem ser obtidas em <http://java.sun.com/j2se/1.5.0/docs/guide/language/generics.html>.

qual implementa o comportamento comum a ambas as classes. Os principais métodos das classes *fonte* são:

- *step()*: método implementado na superclasse *SimpleSource* invocado pelo *Repast* a cada *tick*. Responsável pelo comportamento do agente.
- *getNextAgent()*: método abstrato definido na superclasse *SimpleSource* e implementado pelas classes *PatientSource* e *LiverSource*. É responsável por instanciar e popular os atributos do agente criado pela *fonte* conforme sua natureza, ou seja, a classe *PatientSource* cria *pacientes* e a *LiverSource* cria *fígados*.

A figura 8 apresenta um diagrama de sequência ilustrando o processo de criação de um paciente e sua inscrição no sistema de filas. Um processo semelhante ocorre com o fígado.

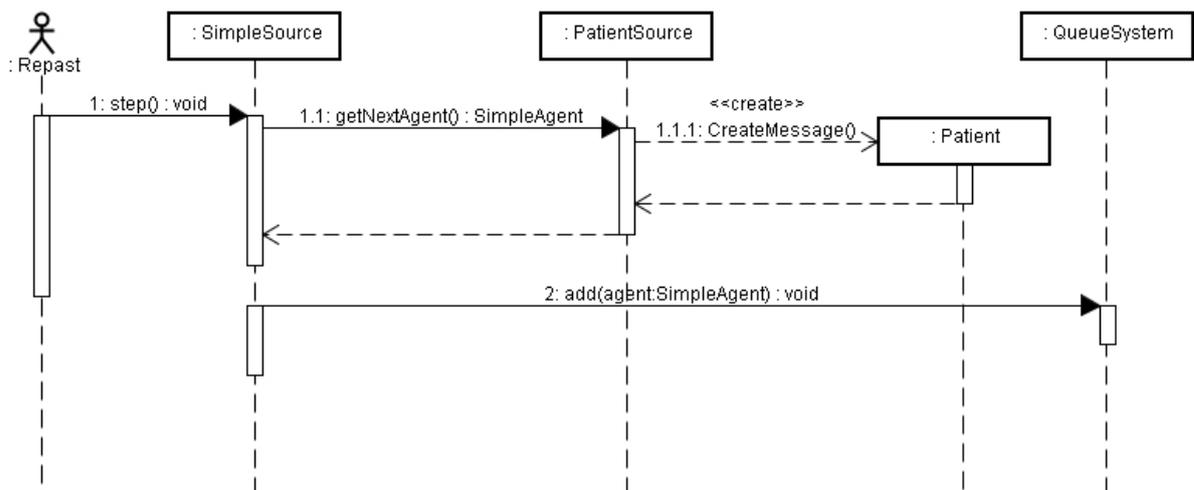


Figura 8: Diagrama de sequência ilustrando a criação de um paciente e sua inscrição no sistema de filas.

3.3.6 Serviço

Serviço é o agente que representa a cirurgia de transplante de um órgão para um paciente receptor, cuja duração, neste contexto, é de um *tick*. Esse agente é implementado pela classe *Service*.

Em sua criação pelo *sistema de filas*, ilustrada pelo diagrama apresentado pela figura 9, a classe *Service* recebe o *fígado* doado e o *paciente* receptor.

O método *attend()* da classe *Service* é executado a cada *tick*. Esse método é responsável por transplantar o *paciente* atribuindo-lhe o *fígado* doado e, ao final da cirurgia,

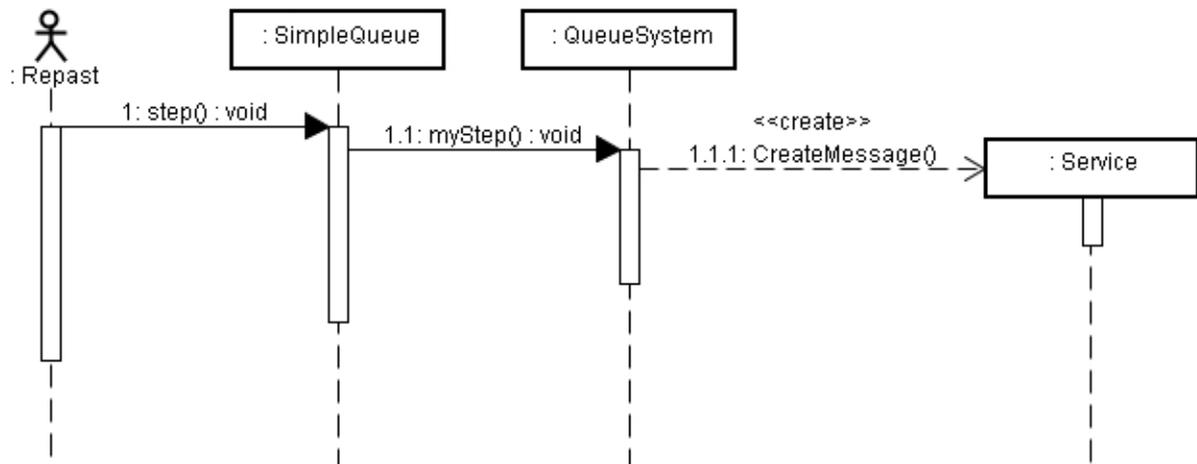


Figura 9: Diagrama de sequência ilustrando a criação de um serviço.

transferir o *paciente* recém-transplantado ao *acompanhamento pós-transplante*. Nesse momento, encerra sua atuação e sai da simulação. Esse processo é ilustrado pelo diagrama de sequência apresentado pela figura 10.

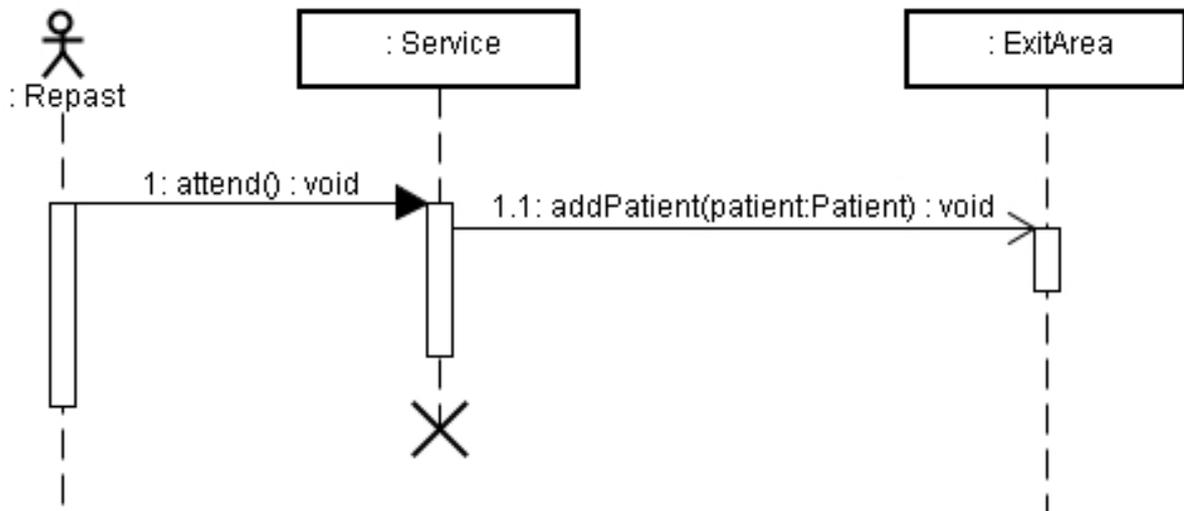


Figura 10: Diagrama de sequência ilustrando a transferência do paciente transplantado para o acompanhamento pós-transplante.

3.3.7 Sistema de Filas

Sistema de Filas representa o Sistema de Filas. Neste trabalho, é o agente responsável por controlar e organizar os elementos das filas (pacientes e fígados), encontrar pacientes compatíveis com os órgãos disponíveis, respeitando a disciplina definida, e criar os serviços de atendimento. A classe que representa esse agente é a *QueueSystem*, cujos principais atributos são:

- *discipline*: disciplina utilizada para definir a ordenação da fila de transplantes;
- *patients*: lista que representa a fila de transplantes com os pacientes que aguardam pela doação de um fígado;
- *livers*: lista onde são armazenados os fígados doados;

Os principais métodos da classe são:

- *myStep()*: assim como no paciente e no fígado, este método define o comportamento do sistema de filas. É o método responsável por organizar as filas, retirando pacientes falecidos, curados e que abandonaram o sistema e também os fígados fora da validade. Ao ser doado um fígado, o *Sistema de Filas* busca por um paciente receptor compatível respeitando a disciplina e, uma vez encontrado, retira-os (*paciente e fígado*) das filas e inicia um *serviço* para realizar o transplante.
- *add()*: método invocado pelas *fontes* e pelo *acompanhamento pós-transplante* para inscrever um elemento (paciente ou fígado) nas filas.

3.3.8 Acompanhamento Pós-transplante

A classe *ExitArea* implementa o agente *acompanhamento pós-transplante* que, por sua vez, representa uma área em que os pacientes transplantados são acompanhados pelo período máximo de um ano. Esse período foi definido arbitrariamente, baseado na literatura que defende a importância de se obter informações sobre os pacientes pelo menos durante um ano após o transplante, como em reportagem da revista *Época* citada por (LIMA, 2006).

A figura 10 ilustra o momento em que um paciente transplantado é inserido na classe *ExitArea* para acompanhamento pós-transplante.

O principal atributo da classe *ExitArea* é a lista *patients* que representa os pacientes transplantados acompanhados pelo período de até um ano.

O principal método de *ExitArea* é o *myStep()* que define o seu comportamento. O diagrama de sequência apresentado pela figura 11 ilustra a reinscrição de um paciente transplantado na fila de espera por causa de problemas com o enxerto.

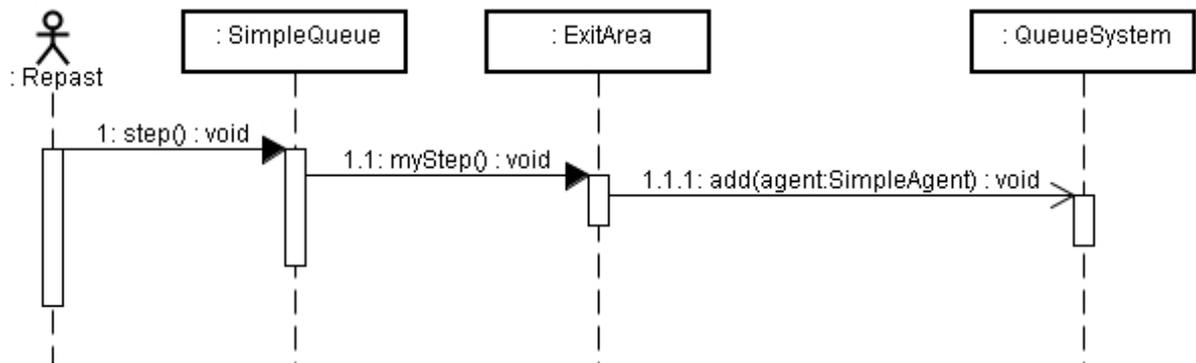


Figura 11: Diagrama de sequência ilustrando a transferência do paciente transplantado para o acompanhamento pós-transplante.

3.3.9 Relatório

A *Report* é a classe responsável pelo controle da quantidade de ocorrências dos eventos que serão considerados nos relatórios e estatísticas. Ela possui vários métodos para acumulação que são invocados por diferentes agentes em vários momentos da simulação. Também possui métodos para recuperação desses valores os quais são invocados pelo *Repast* para geração do conjunto de dados⁷ que serão persistidos como arquivos de *log*. Seus principais atributos são:

- *deathBeforeTransplant*: quantidade de óbitos pré-transplante;
- *deathAfterTransplant*: quantidade de óbitos pós-transplante dentro do período de um ano;
- *transplantedPatients*: quantidade de transplantes;
- *retransplantedPatients*: quantidade de retransplantes;
- *healedPatients*: quantidade de pacientes que saíram da fila por recuperação da função hepática, ou seja, melhora;
- *totalPatients*: quantidade total de pacientes inscritos na fila para transplante ou retransplante;
- *patientsOneYearAfterTransplantation*: quantidade de pacientes que viveram pelo menos um ano após o transplante;

⁷Do inglês *Data sets*.

- *patientsTicksOnQueue*: quantidade de *ticks* aguardados na fila de espera pelos pacientes que foram atendidos;
- *abandon*: quantidade total de abandonos da fila de espera pelos pacientes por qualquer motivo exceto melhora e óbito;
- *missedLivers*: quantidade de órgãos perdidos por não ser possível encontrar um receptor compatível dentro do prazo de sua validade;
- *usedLivers*: quantidade de fígados doados transplantados;
- *totalLivers*: quantidade total de fígados doados;

Todos os métodos da classe *Report*, com exceção do método *getWaitingTimeAverage()*, resumem-se em incrementar e recuperar os valores de seus atributos.

Através do método *getWaitingTimeAverage()*, pode-se obter o tempo médio de espera que é calculado pela fórmula:

$$\text{Tempo Médio de Espera} = \frac{\text{transplantedPatients} + \text{retransplantedPatients}}{\text{patientsTicksOnQueue}}$$

4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta os experimentos computacionais realizados sobre o modelo de simulação com o objetivo de calibrar o simulador e submetê-lo a testes, ilustrando como ele poderia ser utilizado para reproduzir cenários reais e estudar diferentes aspectos do comportamento da fila de transplantes.

A seção 4.1 trata dos tipos e da origem das informações utilizadas pelo modelo e da definição dos seus valores iniciais. Além disso, apresenta o cenário e o processo utilizados para a calibração do modelo.

A seção 4.3 apresenta experimentos realizados sobre o modelo comparando as políticas de alocação de fígados e verificando o impacto da variação da quantidade de fígados doados na quantidade de óbitos por disciplina.

Encerrando o capítulo, são tecidos comentários sobre os resultados dos experimentos na seção 4.4.

Os experimentos descritos neste capítulo foram realizados sobre o sistema operacional *Windows Vista Home Edition* 64 bits executando em um notebook da marca *Gateway* (modelo NV52) com processador *AMD Athlon 64 X2 QL-64* e 4 GB de memória *RAM*. A versão do Java utilizada foi a 1.6.0_17 64 bits.

4.1 Calibração do Modelo

Antes que seja possível utilizar o modelo para realizar simulações, é necessário calibrá-lo. Para calibrar e validar o modelo, é necessário escolher um cenário e levantar informações a partir dele.

Os tipos de informações utilizados pelo modelo são apresentados na subseção 4.1.1.

As informações utilizadas no modelo foram obtidas a partir de diferentes fontes de pesquisa, as quais são apresentadas na subseção 4.1.2.

Os *parâmetros*, e seus respectivos valores, utilizados pelo modelo são apresentados na subseção 4.1.3.

A subseção 4.1.4 apresenta o cenário definido para a calibração do modelo.

A subseção 4.1.5 descreve o processo utilizado para a calibração.

4.1.1 Tipos das Informações Utilizadas pelo Modelo

Para realizar a simulação, é esperado que o modelo necessite de informações. Um subconjunto dessas informações, chamados neste trabalho de *dados de entrada*, é utilizado para alimentar a simulação.

Outro subconjunto dessas informações é chamado neste trabalho de *dados de referência*, os quais, após o término da simulação, são confrontados aos *dados de saída* da simulação para efeito de comparação, funcionando como indicador de quão próximo do real o resultado da simulação está.

Na dinâmica do modelo, entre os *dados de entrada* e os *dados de saída*, estão as informações que orientam a execução da simulação no sentido de obter determinados *dados de saída* em função de determinados *dados de entrada*. Essas informações que intermedeiam o processo são chamadas de *parâmetros* neste trabalho. A figura 12 apresenta um esquema do modelo e as informações utilizadas no processo de calibração.

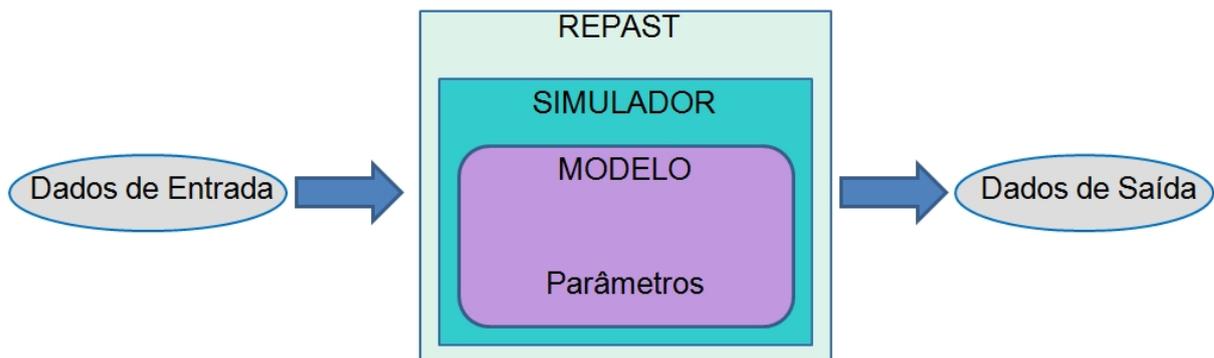


Figura 12: Esquema do modelo quanto às informações utilizadas no processo de calibração [DADOS DA PESQUISA].

Dessa forma, fornecidos certos *dados de entrada*, obtidos a partir de um cenário definido, os *parâmetros* deverão ser ajustados até que os *dados de saída* convirjam para o resultado real observado no cenário escolhido, ou seja, se aproximem dos *dados de referência*. Neste trabalho, esse processo é chamado de *calibração*.

4.1.1.1 Dados de Entrada

O modelo de simulação recebe os seguintes *dados de entrada* para a sua execução:

- Número de dias a serem simulados;
- Quantidade inicial de pacientes na fila;
- Quantidade inicial de fígados disponíveis;
- Taxa média de chegada de pacientes por dia: representa o valor central da distribuição de Poisson que definirá a taxa de chegada de pacientes na fila durante a simulação;
- Taxa média de chegada de fígados por dia: representa o valor central da distribuição de Poisson que definirá a taxa de chegada de órgãos doados durante a simulação;
- Bônus por situação especial: valor a ser somado ao MELD do paciente acometido por determinadas doenças que trazem uma urgência maior à necessidade do transplante;
- Disciplina: indica a política de prioridade da fila de transplantes. Conforme descrito na subseção 3.3.4, ela pode assumir os valores *FCFS* (*First-Come First-Served*), *SFPR* (*Sickest-First Priority Rule*), *HFPR* (*Healthiest-First Priority Rule*) e *SIRO* (*Service In Random Order*) representando as disciplinas *PEPS*, *pior-primeiro*, *melhor-primeiro* e *aleatório*, respectivamente.

4.1.1.2 Parâmetros

Durante a execução da simulação, os agentes utilizam informações e probabilidades que orientam seu comportamento e tomada de decisão. Esses *parâmetros* precisam ser calibrados para que o modelo se comporte de modo que seu resultado convirja para a realidade. São eles:

- Probabilidade de Melhora na Fila de Espera: neste contexto, a *melhora* consiste na recuperação da função hepática do paciente que aguarda na fila de transplantes. Após a melhora, o paciente deixa a fila de espera por não precisar mais de um transplante;
- Probabilidade de morte pós-transplante: representa o risco do paciente falecer após ser transplantado;

- Probabilidade de retransplante: é a probabilidade de um paciente transplantado precisar de um novo transplante;
- Probabilidade de óbito na fila de espera nos próximos 3 meses: dada em função do MELD do paciente;
- Probabilidade de abandono: representa a probabilidade do paciente abandonar a fila de espera por qualquer motivo exceto por óbito e por melhora;
- Probabilidade do sexo do paciente: define a probabilidade do sexo do paciente que chega na fila;
- Probabilidade de tipo sanguíneo do paciente e do fígado doado: representa a probabilidade do tipo sanguíneo de pacientes e fígados em sua chegada no sistema;
- Probabilidade do tamanho do paciente e do fígado: representa a probabilidade do tamanho na chegada de pacientes e fígados;
- Probabilidade do valor do índice MELD na chegada de pacientes;
- Probabilidade da doença na chegada de pacientes.

4.1.1.3 Dados de Saída

Durante a simulação, várias informações são recolhidas e armazenadas *tick a tick*. Essas informações, chamadas aqui de *dados de saída*, refletem o estado da simulação no tempo e podem ser utilizadas como indicadores do desempenho da fila e são apresentadas a seguir:

- Informações sobre os pacientes
 - identificador: Número que identifica um paciente na simulação;
 - *tick* de inscrição do paciente na fila;
 - *tick* em que o paciente deixou a fila;
 - quantidade de *ticks* na fila;
 - tipo sanguíneo;
 - tamanho;
 - doença;

- MELD;
 - estado do paciente: representa o estado do paciente o qual pode ser *doente*, *transplantado*, *doente novamente*, *retransplantado*, *curado* e *falecido*;
 - *tick* em que o paciente faleceu.
- Informações sobre os fígados
 - identificador: Número que identifica um fígado na simulação;
 - *tick* em que o fígado tornou-se disponível;
 - *tick* em que o fígado perdeu sua validade;
 - tipo sanguíneo;
 - tamanho;
 - estado do fígado: pode ser *útil*, *sem utilidade*, *utilizado*;
- Estatística
 - quantidade de óbitos pré-transplante;
 - quantidade de óbitos pós-transplante dentro do período de um ano;
 - quantidade de transplantes;
 - quantidade de retransplantes;
 - quantidade de pacientes que saíram da fila por recuperação da função hepática, ou seja, melhora;
 - quantidade total de pacientes inscritos na fila para transplante ou retransplante;
 - quantidade de pacientes que viveram pelo menos um ano após o transplante;
 - quantidade de *ticks* aguardados na fila de espera pelos pacientes que foram atendidos;
 - quantidade total de abandono da fila de espera pelos pacientes por qualquer motivo exceto melhora e óbito;
 - quantidade de fígados perdidos por não ser possível encontrar um receptor compatível dentro do prazo de sua validade;
 - quantidade de fígados doados transplantados;
 - quantidade total de fígados doados;

- tempo médio de espera na fila.

Portanto, para o processo de calibração, *dados de entrada* serão fornecidos à simulação e *dados de saída* serão obtidos como resultado da simulação e comparados a *dados de referência*, os quais representam o cenário real. Cada item definido para ser comparado entre os *dados de saída* e os *dados de referência* é chamado neste trabalho de *indicador de comparação*.

Entretanto, é necessário que os *parâmetros* possuam algum valor para que a simulação possa ser executada. Diante disso, é necessário fornecer valores iniciais aos *parâmetros* para que, a partir daí, eles possam ser ajustados pelo processo calibração.

4.1.2 *Origem dos dados*

Neste trabalho, os *parâmetros* do modelo, ou seja, as informações para alimentação do modelo e base para o comportamento e tomada de decisão dos agentes, foram obtidos diretamente a partir de várias fontes de pesquisa.

Entretanto, em alguns casos, os dados fornecidos pelas fontes de pesquisa precisaram ser trabalhados antes de serem utilizados. Dessa forma, é interessante a apresentação de algumas fontes de pesquisa e uma breve explicação de como suas informações foram obtidas.

4.1.2.1 Relatório da análise dos dados dos pacientes da Fila de Transplantes de Belo Horizonte

(ROSA; FERREIRA; OLIVEIRA, 2009) trata-se de um relatório não publicado, fruto desta pesquisa, resultado da análise dos dados dos pacientes da Fila de Transplantes do Hospital das Clínicas de Belo Horizonte. As informações foram anonimizadas e cedidas pela coordenação do grupo de transplantes de fígado de Minas Gerais.

4.1.2.2 Artigo *The new liver allocation system*

De (FREEMAN et al., 2002), foi retirada a probabilidade de morte nos próximos 3 meses em função do MELD, através da análise do gráfico da curva de sobrevivência apresentado pela figura 13.

O gráfico apresentado pela figura 13 foi retirado de (FREEMAN et al., 2002) e indica o percentual de sobrevivência de pacientes aguardando um transplante, em função do

valor do MELD.

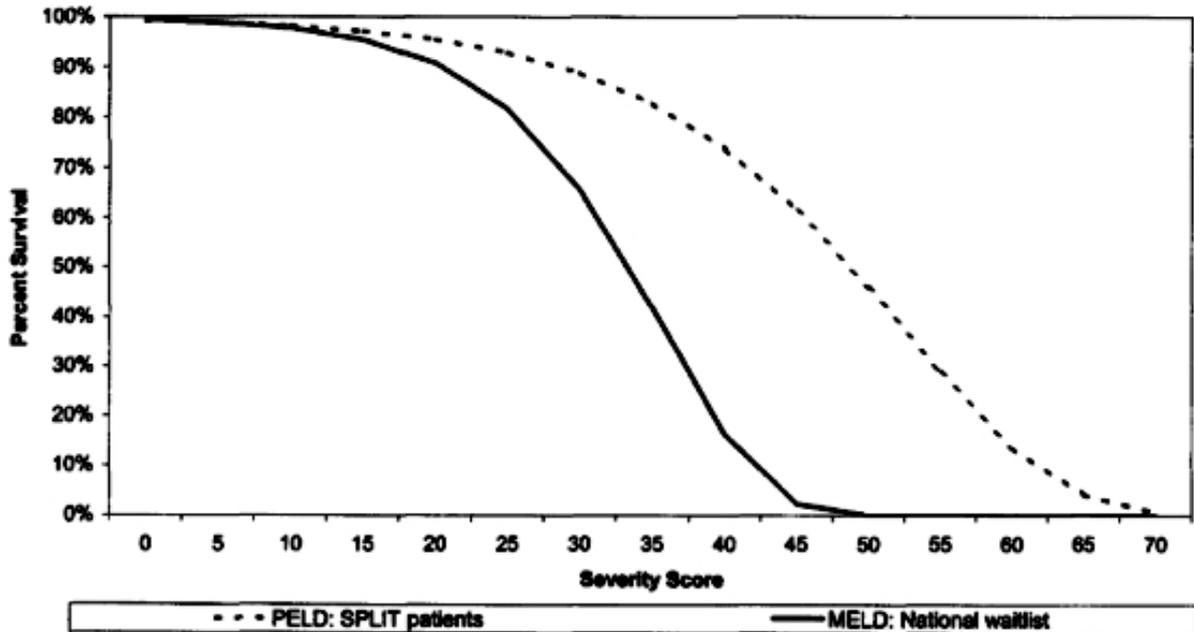


Figura 13: Curva de sobrevivência de pacientes em função do MELD. Fonte: (FREEMAN et al., 2002)

A partir do gráfico apresentado pela figura 13, foram estimados valores de probabilidade de óbito em função do MELD, apresentados pela tabela 2.

A figura 14 apresenta um gráfico representando os dados da tabela 2.

4.1.2.3 Relatório anual de 2007 - OPTN

A fonte (OPTN,) refere-se a uma base de dados disponibilizada por uma instituição chamada OPTN (*Organ Procurement and Transplantation Network*). É intitulado “Relatório anual de 2007” e apresenta diversos relatórios contendo informações sobre transplantes de órgãos em geral. Neste trabalho, foi utilizado o relatório das características dos pacientes ativos na fila de transplantes de fígado de 1997 a 2006.

O relatório das características dos pacientes ativos na fila de transplantes de fígado de 1997 a 2006 apresenta diferentes informações, dentre as quais, o percentual de pacientes dentro das faixas de valor MELD, utilizado neste trabalho.

Foi necessário trabalhar os dados desse relatório para que eles pudessem ser utilizados nesta pesquisa. Os passos realizados são descritos a seguir.

1. Transformar os dados de dez anos em apenas um percentual por faixa que represen-

Tabela 2: Probabilidade de óbito em função do MELD

MELD	Probab.	MELD	Probab.	MELD	Probab.
6	1.67%	21	11.33%	36	62.67%
7	1.83%	22	12.67%	37	67.33%
8	2.17%	23	15.67%	38	76.33%
9	2.33%	24	17.33%	39	80.67%
10	2.5%	25	19.0%	40	85.0%
11	3.0%	26	21.33%	41	87.33%
12	3.5%	27	23.67%	42	89.67%
13	4.33%	28	29.0%	43	94.0%
14	4.67%	29	32.0%	44	96.0%
15	5.0%	30	35.0%	45	98.0%
16	5.67%	31	38.33%	46	98.33%
17	6.33%	32	41.67%	47	98.67%
18	8.0%	33	49.33%	48	99.33%
19	9.0%	34	53.67%	49	99.67%
20	10.0%	35	58.0%	50	100.0%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] estimados a partir da figura 13

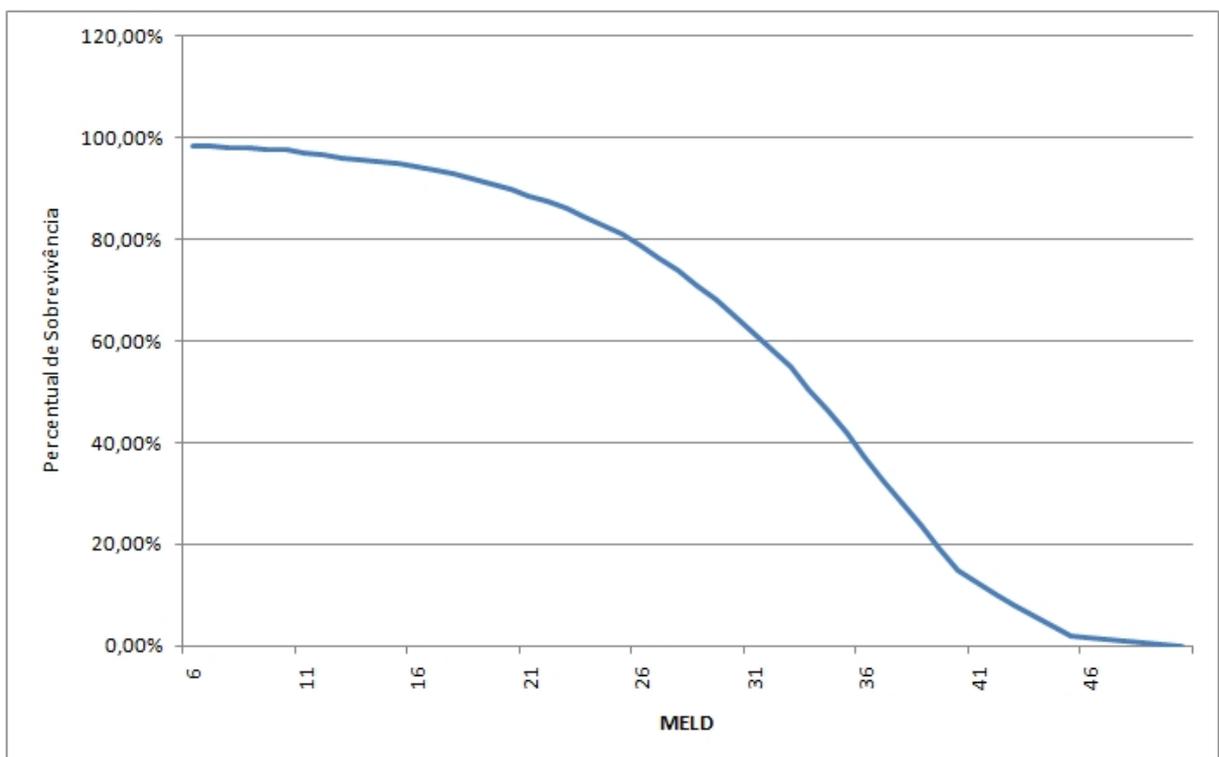


Figura 14: Curva de sobrevivência de pacientes em função do MELD obtida a partir da tabela 2

tasse todos os anos e pudesse ser utilizado como probabilidade.

Para isso, foi calculada a média do percentual de pacientes em cada faixa de valor MELD de 2002 a 2006, pois esses valores não estão disponíveis antes de 2002. Esses valores são apresentados pela tabela 3.

Tabela 3: Percentual de pacientes ativos na fila de transplantes de fígado de 1997 a 2006

Faixa MELD	2002	2003	2004	2005	2006	Média
MELD 6-10	43,50%	40,80%	39,70%	40,70%	40,70%	41,08%
MELD 11-14	28,50%	30,80%	31,80%	31,70%	32,00%	30,96%
MELD 15-20	18,30%	18,80%	19,20%	18,90%	19,20%	18,88%
MELD 21-30	3,70%	3,60%	3,80%	3,40%	3,30%	3,56%
MELD 30	0,40%	0,40%	0,50%	0,40%	0,40%	0,42%
Total	94,40%	94,40%	95,00%	95,10%	95,60%	-

Fonte: Baseada em (OPTN,). Total e Média acrescentados [DADOS DA PESQUISA]

Depois, foi calculada a diferença entre o valor de cada faixa e o valor da faixa de cada ano. Para cada ano, foi calculada a diferença total, através da soma da diferença obtida em cada faixa. A partir dos resultados apresentados pela tabela 4, foi escolhido o ano que obteve a menor diferença absoluta total: o ano de 2003.

Tabela 4: Valor absoluto da diferença entre o valor por faixa da média e cada ano

Faixa MELD	2002	2003	2004	2005	2006
MELD 6-10	2,42%	0,28%	1,38%	0,38%	0,38%
MELD 11-14	2,46%	0,16%	0,84%	0,74%	1,04%
MELD 15-20	0,58%	0,08%	0,32%	0,02%	0,32%
MELD 21-30	0,14%	0,04%	0,24%	0,16%	0,26%
MELD 30	0,02%	0,02%	0,08%	0,02%	0,02%
Total	5,62%	0,58%	2,86%	1,32%	2,02%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 3

2. Desprezar os valores relacionados a outras informações como, por exemplo, o percentual de PELD.

Como valores referentes a outras informações compunham o percentual total nos dados originais apresentados na tabela 3, o somatório do percentual das faixas MELD no ano de 2003 resultou em 94,40%. Diante disso, para o cálculo das probabilidades, foi necessário ajustar os valores de forma que compusessem 100%. Esse ajuste foi feito através de uma regra de três simples, resultando nos valores apresentados pela tabela 5.

Tabela 5: Valores de 2003 ajustados para compôr 100%

Faixa MELD	2003
MELD 6-10	43,22%
MELD 11-14	32,63%
MELD 15-20	19,92%
MELD 21-30	3,81%
MELD 30	0,42%
Total	100,00%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 3

4.1.3 Configuração Inicial

Antes do início da calibração, é necessário levantar informações que possam ser utilizadas para obtenção dos valores iniciais dos *parâmetros* para que, a partir daí, eles possam ser ajustados pelo processo calibração.

Nesta subseção, são apresentados e descritos, quando se fizer necessário, os valores iniciais dados aos *parâmetros* do modelo de simulação, segmentados pelo comportamento dos agentes e entidades.

4.1.3.1 Paciente

O agente *paciente*, em sua existência na simulação, precisa tomar diversas decisões, como, por exemplo, “Devo melhorar?” ou “Devo falecer?”. Todas essas questões possuem certa probabilidade de obterem respostas positivas.

A seguir, são apresentadas as probabilidades utilizadas pelo agente *paciente* seguidas de onde foram retiradas:

- Probabilidade de melhora na fila de espera: 1,15%. Fonte: (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., b);
- Probabilidade de morte pós-transplante: 31,78%. Fonte: (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., b);
- Probabilidade de retransplante: 10%. Fonte: (PRÓ-FÍGADO,);
- Probabilidade de óbito na fila de espera nos próximos 3 meses apresentado na tabela 2 obtidos a partir da curva de sobrevivência de pacientes em função do MELD apresentado pela figura 14 conforme processo descrito na subseção 4.1.2;

- Probabilidade de abandono: 23,03%. Fonte: (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., b).

Quando o agente *paciente* passa do estado “transplantado” ou “retransplantado” ao estado “doente novamente”, o valor do seu MELD passa a ser 25¹. Esse valor foi definido arbitrariamente por não ter sido encontrada essa informação na literatura. Foi definido um valor alto para o MELD baseado no fato de que a literatura apresenta a falha do enxerto como um estado crítico para o paciente.

4.1.3.2 Fontes

No momento de criação de um novo elemento, tanto para um novo *paciente* quanto para um novo *fígado*, as fontes precisam iniciar determinados atributos desses elementos atribuindo-lhes certos valores. Esses valores são apresentados nesta subseção, seguidos de onde foram retirados.

Quanto à *fonte de pacientes*, os atributos do *paciente* preenchidos no momento de sua criação são:

- número sequencial: valor inteiro obtido a partir de uma variável de classe incrementada de 1 após cada paciente ser criado;
- sexo: haverá uma probabilidade de 65,7% de o novo paciente ser do sexo masculino (ROSA; FERREIRA; OLIVEIRA, 2009);
- tipo sanguíneo: sua probabilidade é apresentada pela tabela 6;
- tamanho: pode receber os valores *Big*, *Medium* e *Small*. As probabilidades de tamanho foram definidas arbitrariamente e estão apresentadas na tabela 7;
- índice MELD: pode receber valores de 6 a 50 conforme a probabilidade apresentada na tabela 8 cujos dados foram obtidos pelo processo descrito em 4.1.2. Dentro de cada faixa, os valores estão sujeitos a uma distribuição uniforme;
- doença: pode receber, probabilisticamente, uma das doenças apresentadas na tabela 10.

A *fonte de fígado*, por sua vez, fornece a cada *fígado* criado o valor de cada um destes atributos:

¹Em futuras simulações, esse valor deverá ser 40 para reproduzir melhor a urgência de transplante de um paciente com necessidade de retransplante.

- número sequencial: valor inteiro obtido a partir de uma variável de classe incrementada de 1 após cada paciente ser criado;
- tipo sanguíneo: sua probabilidade é apresentada pela tabela 6;
- tamanho: pode receber os valores *Big*, *Medium* e *Small*. As probabilidades de tamanho foram definidas arbitrariamente e estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 6: Probabilidade de tipo sanguíneo de fígado e paciente

Tipo	O-	O+	A-	A+	B-	B+	AB-	AB+
Probabilidade	5,3%	42%	4,1%	32,2%	1,4%	11,1%	0,4%	3,5%

Fonte: Distribuição de tipo sanguíneo Brasil (HEMOMINAS,)

Tabela 7: Probabilidade de tamanho de fígado e paciente

Tamanho	Pequeno	Médio	Grande
Probabilidade	30%	40%	30%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA]

Tabela 8: Probabilidade de morte pelo MELD

MELD	Probabilidade
6 - 10	43,22%
11 - 14	32,63%
15 - 20	19,92%
21 - 30	3,81%
30	0,42%

Fonte: Calculado a partir de (OPTN,)

Diferentes tipos de doença levam os pacientes à fila de transplantes. A tabela 9 apresenta a relação de doenças encontradas durante a análise da fila de transplantes de fígado de Belo Horizonte, bem como o percentual de ocorrência de cada uma em relação ao total.

A partir das informações apresentadas na tabela 9, foi definido arbitrariamente um grupo de doenças que as representasse. Portanto, no escopo deste modelo, os tipos de doença podem ser:

- *Cirrose etanólica*: doença que, segundo a tabela 9, representa o maior percentual de ocorrência;

Tabela 9: Ocorrência de doenças na fila de transplantes de fígado de Belo Horizonte

Diagnóstico	Percentual
Atresia de vias biliares	1,43%
Carcinoma Hepatocelular	1,43%
Carcinoma Hepatocelular - Cirrose etanólica - Cirrose pós-viral C	1,43%
Carcinoma Hepatocelular - Cirrose pós-viral C	1,43%
Cirrose auto-imune	1,43%
Cirrose biliar primária	2,85%
Cirrose biliar secundária - Cirrose pós-viral C	1,43%
Cirrose criptogênica	14,29%
Cirrose etanólica	25,71%
Cirrose etanólica - Cirrose pós-viral C	4,29%
Cirrose pós-viral B	10,00%
Cirrose pós-viral C	18,57%
Deficiência de alfa-1 antitripsina	1,43%
Doença de Wilson	1,43%
Hemocromatose	1,43%
Hepatite fulminante	2,85%
Sem diagnóstico	5,71%
Síndrome de Budd-Chiari	2,86%

Fonte: (ROSA; FERREIRA; OLIVEIRA, 2009)

- *Cirrose pós-viral B e C*: foram agrupados os tipos B e C de Cirrose pós-viral, representando juntas mais de um quarto das doenças apresentadas na tabela 9, em um único tipo de doença;
- *Cirrose criptogênica*: representa a terceira maior ocorrência entre as doenças apresentadas na tabela 9;
- *Carcinoma Hepatocelular*: representa um tipo de doença que leva o paciente à “situação especial” onde há urgência maior do transplante. Doenças desse tipo recebem um valor de bônus que é somado ao MELD do paciente;
- *Outras*: representa o restante das doenças apresentados na tabela 9 e não mencionados nestes itens.

Os tipos de doença definidos para representar as doenças apresentadas pela tabela 9, bem como seu percentual de ocorrência são apresentados pela tabela 10.

De posse de mais informações, poderiam ter sido escolhidos outros critérios para a escolha das doenças como, por exemplo, a similaridade na curva de evolução do MELD.

Tabela 10: Probabilidade de doença

Doença	Probabilidade
Cirrose etanólica	25,71%
Cirrose pós-viral B e C	28,57%
Cirrose criptogênica	14,29%
Carcinoma Hepatocelular	1,43%
Outras	30%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] a partir da tabela 9.

4.1.4 Cenário

Para o processo de calibração, é necessária a definição de um cenário real com o qual o resultado da simulação é confrontado. A partir desse cenário são obtidos os valores dos *dados de entrada* para o modelo de simulação e também definidos os valores de cada *indicador de comparação dos dados de referência* os quais serão comparados aos valores dos *indicadores de comparação dos dados de saída* da simulação para efeito de aferição do modelo.

(SANCHEZ; LUCAS, 2002) sugerem que, para calibrar o modelo, o pesquisador comece executando simulações de alguns cenários simples devido à dificuldade de calibração que alguns modelos baseados em agentes podem apresentar.

O cenário escolhido para o processo de calibração retrata a fila de espera por transplante de fígado no estado de São Paulo segundo dados obtidos a partir do censo do ano 2008 produzido pela Secretaria de Saúde do Estado de São Paulo (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., b). Essas informações são apresentadas pela tabela 11.

A partir das informações apresentadas pela tabela 11, os valores dos *dados de entrada* para o modelo foram obtidos através do cálculo das fórmulas apresentadas na tabela 12.

Os valores calculados pelas fórmulas da tabela 12 são apresentados pela tabela 13.

A “disciplina” recebeu o valor *SFPR* (*pior-primeiro*) porque os dados apresentados na tabela 11 referem-se a uma fila de transplantes de fígado cuja ordenação é dada pela gravidade dos pacientes, representada pelo índice MELD, do pior para o melhor.

A “quantidade inicial de fígados disponíveis” e “bônus por situação especial” receberam o valor 0, por essas informações não estarem disponíveis em (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., b).

Tabela 11: Cenário - Censo da lista de espera por fígado no estado de São Paulo em 2008

(P)PERÍODO	01/01/2008 à 31/12/2008
(Ci)CADASTRO TÉCNICO INICIAL	3.493
(E)ENTRADAS	1.212
(I)Inscrições	1.212
(S)SAÍDAS	2.132
(Tdv)Transplante com doador vivo	79
(Tfe)Transplante fora do Estado	8
(Tps)Transplante pelo sistema	455
(Tsc)Transplante sem confirmação	3
(A)Abandonou o tratamento	10
(Fhr)Função Hepática recuperada	54
(NQT)Não quer ser transplantado	15
(Rid)Removido (Inscrição duplicada)	2
(Rmv)Removido (MELD/PELD vencido > 365 dias)	835
(Rs)Removido (suspenso > 365 dias)	113
(Rpe)Removido pela equipe	32
(Rsc)Removido sem condições clínicas	50
(Toe)Transferido para outro Estado	17
(O)Óbito pré-transplante	459
(Cf)CADASTRO TÉCNICO FINAL	2.573

Fonte: (SIST. EST. DE TRANSP. S.P., b). Identificadores acrescentados.

Tabela 12: Fórmulas dos *dados de entrada* extraídos do cenário

Dados de Entrada	Fórmula
Número de dias a serem simulados	(P)
Quantidade inicial de pacientes na fila	(Ci)
Quantidade inicial de fígados disponíveis	-
Taxa média de chegada de pacientes por dia	$\frac{(I)-(Rid)}{(P)}$
Taxa média de chegada fígados por dia	$\frac{(Tdv)+(Tps)}{(P)}$
Bônus por situação especial	-
Disciplina	<i>pior-primeiro</i>

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] baseado na tabela 11

Tabela 13: Valores dos *dados de entrada* extraídos do Censo 2008

Dados de Entrada	Valor
Número de dias a serem simulados	365
Quantidade inicial de pacientes na fila	3.493
Quantidade inicial de fígados disponíveis	0
Taxa média de chegada de pacientes por dia	3,32
Taxa média de chegada de fígados por dia	1,46
Bônus por situação especial	0
Disciplina	<i>SFPR</i>

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] a partir da tabela 12

Para a comparação entre os *dados de saída* da simulação e os *dados de referência* do cenário real, foram definidos os seguintes *indicadores de comparação*, a partir dos dados apresentados pela tabela 11:

- Tamanho total da Fila: quantidade total de pacientes que passaram pela fila durante a simulação;
- Média de chegada de pacientes (dia): média de pacientes inscritos na fila por dia;
- Média de chegada fígados (dia): média de fígados doados por dia;
- Percentual de Melhora: percentual de pacientes que tiveram sua função hepática restabelecida e não necessitaram mais de um transplante;
- Percentual de Óbito pré-transplante: percentual de óbitos de pacientes que aguardavam na fila de espera por um transplante;
- Percentual de Abandono: percentual de pacientes que abandonaram a fila por qualquer motivo, exceto por melhora, por óbito ou por transplante;

As fórmulas de cálculo para obtenção dos valores dos *dados de referência* são apresentadas na tabela 14.

Aplicando as fórmulas apresentadas na tabela 14, obtém-se os valores apresentados pela tabela 15.

Nesta subseção, foi apresentado o cenário e, a partir dele, extraídos os *dados de entrada* para o modelo de simulação. Foram definidos os *indicadores de comparação* utilizados para comparar os *dados de referência*, cujos valores foram obtidos a partir do cenário, aos valores dos *dados de saída*, provenientes do resultado da simulação.

A subseção 4.1.5 apresenta o processo de calibração do modelo.

Tabela 14: Fórmulas dos *dados de referência* extraídos do Censo 2008

Indicadores de Comparação	Fórmula
Tamanho total da Fila	$(I) - (Rid) + (E)$
Média de chegada de pacientes por dia	$\frac{(I) - (Rid)}{(P)}$
Média de chegada figados por dia	$\frac{(Tdv) + (Tps)}{(P)}$
Percentual de melhora	$\frac{(Fhr)}{(Ci) + (E)} \times 100$
Percentual de óbito pré-transplante	$\frac{(O)}{(Ci) + (E)} \times 100$
Percentual de Abandono	$\frac{(Tfe) + (Tsc) + (A) + (NQT) + (Rmv) + (Rs) + (Rpe) + (Rsc) + (Toe)}{(P)} \times 100$

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] baseado na tabela 11

Tabela 15: Valores dos *dados de referência* extraídos do Censo 2008

Parâmetro	Valor
Tamanho total da Fila	4.703
Média de chegada de pacientes por dia	3,32
Média de chegada de figados por dia	1,46
Percentual de Melhora	1,15%
Percentual de Óbito pré-transplante	9,76%
Percentual de Abandono	23,03%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] a partir da tabela 14

4.1.5 Metodologia de Calibração

Uma vez definidos o cenário, os valores dos *dados de entrada*, os *indicadores de comparação*, os valores iniciais dos *parâmetros* e dos *dados de referência*, foi necessário ajustar os valores dos *parâmetros*. Esse ajuste foi necessário para que, em função dos valores dos *dados de entrada*, os valores dos *dados de saída* convergissem para os valores dos *dados de referência*, ou seja, o resultado da simulação se aproximasse da realidade. Para isso foi definido:

1. um método para comparar os *dados de saída* das simulações aos *dados de referência* apresentados na tabela 13;
2. que o simulador é considerado calibrado quando, para cada um dos indicadores de comparação apresentados na subseção 4.1.4, a relação entre os *dados de saída* e os *dados de referência* estiver dentro de uma margem de variação de 5%.

Para atender ao proposto no primeiro item da metodologia, foi definido que seriam calculados os percentuais dos valores dos *dados de saída*, os quais seriam divididos pelos percentuais representados pelos valores dos *dados de referência*. Do resultado dessa relação seria subtraído 1 para que o valor do percentual de diferença fosse obtido. Essa diferença foi chamada de *erro*.

Seja i um índice que aponte para um certo *indicador de comparação* nos *dados de saída* e nos *dados de referência*, $erro_i$ representará o valor do percentual de diferença do i ésimo *indicador de comparação* na relação entre os *dados de saída* e os *dados de referência* e pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$erro_i = \left(\frac{DadosSaída_i}{DadosReferência_i} - 1 \right) \times 100$$

O *erro* representa a diferença relativa entre os *dados de saída* e os *dados de referência*. Ele é importante, pois é obtido em função do contexto reproduzido, permitindo uma comparação direta e objetiva.

Para automatizar a comparação entre os *dados de saída* e os *dados de referência*, foi usada uma planilha eletrônica. Essa planilha recebe os arquivos gerados pelo simulador contendo o resultado da simulação, ou seja, os *dados de saída*, e os apresenta, comparando-os aos *dados de referência*, calculando o valor do *erro* e sugerindo ajustes para os *parâmetros* avaliados.

Inicialmente, simulações foram executadas para teste do modelo. Em seguida, os *dados de entrada* receberam os valores determinados na tabela 13. A simulação era executada e os arquivos contendo os resultados eram importados pela planilha que calculava a relação entre os *dados de saída* e os *dados de referência* e, baseado nessa relação, um valor de ajuste era proposto. Esse processo foi repetido até que o valor da relação ficou dentro de 20% do valor dos *dados de referência*.

Então, passou-se ao ajuste fino através de um processo semelhante, onde uma simulação era executada, seus resultados eram importados por uma planilha que calculava as relações entre os *dados de saída* e os *dados de referência*. Após cinco execuções, a média era calculada e, sobre ela, o *erro*. Baseado no *erro*, um fator de ajuste era sugerido, os *parâmetros* eram ajustados e reiniciava-se uma nova simulação. Todo esse processo foi repetido até que chegou-se a valores de *erro* dentro de uma margem de 5%, conforme definido no item 3 da metodologia.

Deve ser ressaltado que a probabilidade de morte na fila (óbito pré-transplante) não é um *parâmetro* direto, pois, o óbito ocorre em função do MELD de cada paciente.

A tabela 16 apresenta os valores finais da média da relação dos *dados de saída* pelos *dados de referência* apresentados na tabela 15 (esperado).

Tabela 16: Comparação dos *dados de saída* com os *dados de referência* ao final da calibração

Indicador de comparação	<i>dados de referência</i>	<i>dados de saída</i>	<i>erro</i>
Tamanho total da Fila	4.703	4.722	0,41%
Média de chegada de pacientes (dia)	3,32	3,37	1,50%
Média de chegada fígados (dia)	1,46	1,46	-0,23%*
Percentual de Melhora	1,15%	1,10%	-4,20%
Percentual de Óbito pré-transplante	9,76%	9,64%	-1,27%
Percentual de Abandono	23,03%	23,46%	1,88%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 15.

* Diferença encontrada nos cálculos realizados com uma precisão maior que duas casas decimais.

4.2 Estudo de Caso

A seção 4.1 descreve o processo de calibração do modelo. Uma vez calibrado, o modelo foi submetido a um estudo de caso. O estudo de caso consiste em verificar o comportamento do modelo simulando um outro cenário real semelhante ao utilizado no processo de calibração. Dessa forma, assim como no processo de calibração, é necessário escolher um cenário e levantar informações a partir dele. Esta seção apresenta esse estudo de caso.

Os tipos de informações utilizados pelo modelo, bem como as diferentes fontes de pesquisa utilizadas para extrair as informações necessárias ao modelo são as mesmas do processo de calibração e são apresentadas pela seção 4.1.

A subseção 4.2.1 apresenta o cenário definido para o estudo de caso.

A subseção 4.2.2 descreve o processo utilizado para a simulação do estudo de caso.

4.2.1 Cenário

Assim como no processo de calibração, para o estudo de caso, é necessária a definição de um cenário real. A partir desse cenário são obtidos os valores dos *dados de entrada* para o modelo de simulação e também definidos os valores de cada *indicador de comparação* dos *dados de referência* os quais serão comparados aos valores dos *indicadores de comparação* dos *dados de saída* da simulação.

O cenário escolhido para o estudo de caso retrata a fila de espera por transplante de fígado no estado de São Paulo segundo dados obtidos a partir do censo do ano 2007 produzido pela Secretaria de Saúde do Estado de São Paulo (SIST.EST.DE TRANSP.S.P., a). Essas informações são apresentadas pela tabela 17.

Tabela 17: Cenário - Censo da lista de espera por fígado no estado de São Paulo em 2007

(P)PERÍODO	01/01/2007 à 31/12/2007
(Ci)CADASTRO TÉCNICO INICIAL	3.904
(E)ENTRADAS	1.021
(I)Inscrições	1.021
(S)SAÍDAS	1.439
(Tdv)Transplante com doador vivo	95
(Tfe)Transplante fora do Estado	5
(Tps)Transplante pelo sistema	331
(Tsc)Transplante sem confirmação	5
(A)Abandonou o tratamento	5
(FHR)Função Hepática recuperada	45
(NQT)Não quer ser transplantado	14
(Rid)Removido (Inscrição duplicada)	5
(Rs)Removido (suspensão > 365 dias)	119
(Rpe)Removido pela equipe	44
(Rsc)Removido sem condições clínicas	50
(Toe)Transferido para outro Estado	15
(O)Óbito pré-transplante	706
(Cf)CADASTRO TÉCNICO FINAL	3.486

Fonte: (SIST. EST. DE TRANSP. S.P., a). Identificadores acrescentados.

Ao comparar os dados do censo de 2007, apresentados pela tabela 17, e os dados do censo de 2008 utilizado no processo de calibração, apresentados pela tabela 11, pode-se observar que, no censo de 2007, não há informação sobre pacientes removidos da fila por exame de MELD vencido a mais de 365 dias, enquanto o censo de 2008 registra 835 pacientes nessa situação.

A partir das informações apresentadas pela tabela 17, os valores dos *dados de entrada* para o modelo foram obtidos através do cálculo das fórmulas apresentadas na tabela 18.

Os valores calculados pelas fórmulas da tabela 18 são apresentados pela tabela 19.

Os dados apresentados na tabela 17 referem-se a uma fila de transplantes de fígado cuja ordenação é dada pela gravidade dos pacientes, representada pelo índice MELD, do pior para o melhor. Para reproduzir essa ordenação, a “disciplina” recebeu o valor *SFPR* (*pior-primeiro*).

A “quantidade inicial de fígados disponíveis” e o “bônus por situação especial” receberam o valor 0, pelo fato dessas informações não estarem disponíveis em (SIST. EST. DE TRANSP. S.P., a).

Tabela 18: Fórmulas dos *dados de entrada* extraídos do cenário

Dados de Entrada	Fórmula
Número de dias a serem simulados	(P)
Quantidade inicial de pacientes na fila	(Ci)
Quantidade inicial de fígados disponíveis	-
Taxa média de chegada de pacientes por dia	$\frac{(I)-(Rid)}{(P)}$
Taxa média de chegada fígados por dia	$\frac{(Tdv)+(Tps)}{(P)}$
Bônus por situação especial	-
Disciplina	<i>pior-primeiro</i>

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] baseado na tabela 17

Tabela 19: Valores dos *dados de entrada* extraídos do Censo 2007

Dados de Entrada	Valor
Número de dias a serem simulados	365
Quantidade inicial de pacientes na fila	3.904
Quantidade inicial de fígados disponíveis	0
Taxa média de chegada de pacientes por dia	2,78
Taxa média de chegada fígados por dia	1,17
Bônus por situação especial	0
Disciplina	<i>SFPR</i>

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] a partir da tabela 18

Para a comparação entre os *dados de saída* da simulação e os *dados de referência* do cenário real, foram definidos os seguintes *indicadores de comparação*, a partir dos dados apresentados pela tabela 17:

- Tamanho total da fila: quantidade total de pacientes que passaram pela fila durante a simulação;
- Média de chegada de pacientes (dia): média de pacientes inscritos na fila por dia;
- Média de chegada fígados (dia): média de fígados doados por dia;
- Percentual de Melhora: percentual de pacientes que tiveram sua função hepática restabelecida e não necessitaram mais de um transplante;
- Percentual de Óbito pré-transplante: percentual de óbitos de pacientes que aguardavam na fila de espera por um transplante;
- Percentual de Abandono: percentual de pacientes que abandonaram a fila por qualquer motivo, exceto por melhora, por óbito ou por transplante;

As fórmulas de cálculo para obtenção dos valores dos *dados de referência* são apresentadas pela tabela 20.

Tabela 20: Fórmulas dos *dados de referência* extraídos do Censo 2007

Indicadores de Comparação	Fórmula
Tamanho total da Fila	$(I) - (Rid) + (E)$
Média de chegada de pacientes por dia	$\frac{(I) - (Rid)}{(P)}$
Média de chegada fígados por dia	$\frac{(Tdv) + (Tps)}{(P)}$
Percentual de melhora	$\frac{(FHR)}{(Ci) + (E)} \times 100$
Percentual de óbito pré-transplante	$\frac{(O)}{(Ci) + (E)} \times 100$
Percentual de Abandono	$\frac{(Tfe) + (Tsc) + (A) + (NQT) + (Rs) + (Rpe) + (Rsc) + (Toe)}{(P)} \times 100$

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] baseado na tabela 17

Aplicando as fórmulas apresentadas na tabela 20, obtêm-se os valores apresentados pela tabela 21.

Nesta subseção, foi apresentado o cenário e, a partir dele, extraídos os *dados de entrada* para o modelo de simulação. Foram definidos os *indicadores de comparação* utilizados para comparar os *dados de referência*, cujos valores foram obtidos a partir do cenário, aos valores dos *dados de saída*, provenientes do resultado da simulação.

A subseção 4.2.2 apresenta o processo utilizado para a simulação desse cenário.

Tabela 21: Valores dos *dados de referência* extraídos do Censo 2007

Parâmetro	Valor
Tamanho total da Fila	4.920
Média de chegada de pacientes por dia	2,78
Média de chegada fígados por dia	1,17
Percentual de Melhora	0,91%
Percentual de Óbito pré-transplante	14,35%
Percentual de Abandono	5,22%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] a partir da tabela 20

4.2.2 Metodologia de Simulação do Estudo de Caso

Uma vez definidos o cenário, os valores dos *dados de entrada*, os *indicadores de comparação* e dos *dados de referência*, cinco simulações foram executadas e a média dos resultados foi comparada aos dados do cenário real.

Para comparar o resultado da simulação com os dados reais foi utilizado o *erro* definido no processo de calibração, apresentado pela subseção 4.1.4. O *erro* representa a diferença relativa entre os *dados de saída* e os *dados de referência*.

Observando a tabela 17, é importante observar que não há informação sobre pacientes removidos por exame de MELD vencido a mais de 365 dias. No censo de 2008, apresentado pela tabela 11, 835 pacientes estavam nessa situação. Esse valor representa 17,75% do total de pacientes considerados no censo de 2008. Por isso, o valor da probabilidade de abandono utilizado no processo de validação teve que ser ajustado para evitar distorções e retratar o cenário real.

A tabela 22 apresenta os valores finais da média da relação dos *dados de saída* pelos *dados de referência* apresentados na tabela 21.

Tabela 22: Comparação dos *dados de saída* com os *dados de referência* ao final da simulação

Indicador de comparação	<i>dados de referência</i>	<i>dados de saída</i>	<i>erro</i>
Tamanho total da Fila	4.920	4.928	0,15%
Média de chegada de pacientes (dia)	2,78	2,80	0,71%
Média de chegada fígados (dia)	1,17	1,20	2,77%
Percentual de Melhora	0,91%	1,20%	31,59%
Percentual de Óbito pré-transplante	14,35%	11,22%	-21,78%
Percentual de Abandono	5,22%	6,39%	22,42%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 21.

* Diferença encontrada nos cálculos realizados com uma precisão maior que duas casas decimais.

Os dados apresentados pela tabela 22 indicam a diferença entre o cenário real e o resultado da simulação. O percentual de melhora tem um aumento em cerca de um terço em relação ao cenário real e os percentuais de óbito pré-transplante e abandono variam em cerca de um quinto em relação ao cenário real. Esses valores foram considerados aceitáveis no contexto deste trabalho, indicando um comportamento satisfatório do modelo de simulação.

4.3 Experimentos Exploratórios

Calibrados os *parâmetros* e realizado um estudo de caso, alguns experimentos foram realizados buscando ilustrar como o modelo poderia ser utilizado para ajudar a responder questões. Uma indagação que naturalmente surge é *quais seriam as diferenças entre as políticas de ordenação da fila implementadas?*

Entretanto, no cenário disponível, os valores dos *dados de saída* são resultado de uma política de ordenação baseada na gravidade do paciente, ou seja, *pior-primeiro*. Dessa forma, comparar as políticas não é algo simples porque cada disciplina a ser simulada representa um cenário distinto, dos quais, exceto pela *pior-primeiro*, não há *dados de referência* de um cenário real disponíveis para serem comparadas aos resultados das simulações. Portanto, o cenário descrito na subseção 4.1.4 será utilizado nesta seção apenas como referência de comparação entre as disciplinas.

Quanto à definição das informações a serem comparadas, segundo Ioannu², citado por (LIMA, 2006), teoricamente, um sistema de alocação de órgãos perfeito deveria minimizar a mortalidade e as exclusões da lista de espera e maximizar a sobrevida pós-transplante.

Diante disso, mesmo considerando os principais tipos de indicadores de desempenho de um sistema de filas, destacados em (GROSS; HARRIS, 1998) e apresentados na seção 2.1, entendeu-se que, no contexto deste modelo, seria mais relevante considerar a melhora, o óbito pré-transplante e o abandono como *indicadores de desempenho* do sistema de filas.

Nesta seção, a subseção 4.3.1 apresenta um experimento de comparação das políticas de alocação de fígados.

A subseção 4.3.2 apresenta um experimento de verificação do impacto da variação da quantidade de fígados doados na quantidade de óbitos por disciplina.

²Ioannu GN. Liver Transplant 13:937, 2007.

4.3.1 Comparação das políticas de alocação

Com o objetivo de experimentar o simulador e verificar quais seriam seus resultados, caso outras disciplinas fossem utilizadas, foram executadas simulações tomando como base o mesmo cenário apresentado na subseção 4.1.4 alterando apenas a *disciplina* nos *dados de entrada*. Serão considerados os *dados de referência* utilizados no processo de calibração.

De forma semelhante ao processo de calibração, descrito na seção 4.1, foi definido que seriam calculados os percentuais dos valores dos *dados de saída*, os quais seriam divididos pelos percentuais representados pelos valores dos *dados de referência*. Do resultado dessa relação seria subtraído 1 para que o valor do percentual de diferença fosse obtido. Por questões de semântica, o resultado desse cálculo foi chamado de *diferença*.

Seja i um índice que aponte para um certo *indicador de comparação* nos *dados de saída* e nos *dados de referência*, $diferenca_i$ representará o valor do percentual de diferença do i ésimo *indicador de comparação* na relação entre os *dados de saída* e os *dados de referência* e pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$diferenca_i = \left(\frac{DadosSaida_i}{DadosReferencia_i} - 1 \right) \times 100$$

Os resultados das simulações executadas para cada disciplina são apresentados pela tabela 23. A coluna *Cenário Real* possui *diferença* igual a zero e serve como referência para a comparação das disciplinas. Essa coluna apresenta, entre parênteses, os valores reais obtidos a partir do cenário apresentado pela tabela 11 apenas com o objetivo de fornecer noção de valores.

Tabela 23: Comparação da *diferença* em função das disciplinas

Indicador de Comparação	Cenário Real	Disciplinas			
		<i>pior-primeiro</i>	<i>melhor-primeiro</i>	PEPS	Aleatório
Tamanho total da Fila	0% (4703)	0,41%	-5,84%	-0,31%	-8,79%
Melhora	0% (54)	-4,20%	6,27%	7,34%	25,54%
Óbito pré-transplante	0% (459)	-1,27%	-19,56%	-6,73%	-6,76%
Abandono	0% (1083)	1,88%	10,57%	-1,46%	11,77%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 15

É interessante observar que os dados, apresentados pela tabela 23, sugerem que a antiga política de ordenação PEPS (primeiro a entrar primeiro a sair) seria mais eficiente que a política de ordenação atual por gravidade utilizando o MELD. De acordo com os dados, se fosse utilizada a política de ordenação PEPS, haveria menos óbitos, mais melhora e menos abandono.

De uma forma geral, as diferenças apresentadas pela tabela 15 ficaram dentro de uma margem considerada aceitável de 10%. A *diferença do abandono* obtida nas disciplinas *melhor-primeiro* e *aleatório* ficaram, no máximo, 1,77% acima dos 10% e foram consideradas aceitáveis.

Entretanto, dois valores apresentados pela tabela 15 se destacam. O primeiro é a diminuição da quantidade de óbitos pré-transplante na disciplina *melhor-primeiro*. O segundo e maior é a *melhora* decorrente do uso da disciplina *aleatório*.

A diminuição da quantidade de óbitos pré-transplante na disciplina *melhor-primeiro* parece ir ao encontro da ideia de que um paciente deve ser transplantado o quanto antes evitando que seu estado de saúde piore e aumente sua probabilidade de falecer. Seguindo essa linha, poderia ser dada uma interpretação de que, na *disciplina melhor-primeiro*, os pacientes que se encontram em estado de saúde pior, ou seja, têm um valor do MELD alto, são posicionados no final da fila. Como um valor de MELD alto implica em uma probabilidade maior de falecimento, esse comportamento faz com que o MELD médio dos ocupantes da fila diminua com o tempo. Dessa forma, os pacientes terão, em média, uma probabilidade menor de falecimento, diminuindo a quantidade de óbitos pré-transplante.

Para entender melhor a diminuição da quantidade de óbitos pré-transplante na disciplina *melhor-primeiro*, bem como o aumento da *melhora* decorrente do uso da disciplina *aleatório* as outras diferenças, seria necessária uma investigação mais detalhada. Pistas poderiam ser encontradas através do levantamento de outras informações como, por exemplo, o MELD médio dos pacientes, a evolução do tamanho da fila no tempo, o tempo de espera médio dos pacientes, entre outros. Apesar dessas e outras informações estarem disponíveis e poderem ser direta ou indiretamente obtidas através dos *dados de saída* da simulação para fornecer pistas, neste experimento, não foi empreendido esforço nesse sentido.

Os *dados de saída* utilizados nesta seção são apresentados pela subseção 4.1.1.3. O simulador permite que outras informações sejam acrescentados em futuras simulações, conforme necessidade.

4.3.2 Aumento da disponibilidade de fígados

Uma das vantagens de um modelo é a possibilidade de utilizá-lo em simulações buscando entender certos eventos ou prever o comportamento em um novo contexto. Esse tipo de exercício é também conhecido como “*What if*”, ou seja, “o que aconteceria

se isso ou aquilo fosse diferente?”.

Seguindo essa linha de pensamento, foi proposto um exercício para verificar qual seria o comportamento do modelo caso uma das variáveis variasse ao longo do tempo. Surgiu a curiosidade sobre o reflexo da variação da disponibilidade de fígados na quantidade de óbitos pré-transplante. A partir dessa curiosidade, surgiu a ideia de verificar qual seria a diferença dessa variação em relação às diferentes disciplinas.

Para responder essas questões, realizou-se um processo nos mesmos moldes do processo de “Comparação das políticas de alocação” descrito na subseção 4.3.1. Sobre o mesmo cenário utilizado no processo de calibração, descrito na subseção 4.1.4, foram executadas simulações em que a média de cinco execuções foi utilizada para cálculo do *erro* e comparação com os dados reais. Na tabela 24, é apresentado o *diferença* de cada disciplina em função da variação da oferta de fígados.

Tabela 24: Efeito no óbito pré-transplante variando a disponibilidade de fígados

Disponibilidade de fígados	Disciplinas			
	<i>pior-primeiro</i>	<i>melhor-primeiro</i>	PEPS	Aleatório
+0%	-1,27%	-19,56%	-6,73%	-6,76%
+20%	-1,98%	-24,48%	-11,43%	-5,93%
+40%	-3,50%	-24,83%	-7,74%	-8,94%
+60%	0,46%	-22,67%	-8,13%	-10,52%
+80%	0,09%	-27,13%	-12,13%	-12,65%
+100%	-0,99%	-27,74%	-8,78%	-11,68%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 15.

A tabela 24 sugere que há pouca variação da quantidade de óbitos em cada disciplina em função do aumento da oferta de fígados. Esse fato gerou curiosidade, pois, se a quantidade de fígados disponíveis aumenta porque não diminui a quantidade de óbitos pré-transplante? Foi então observada a quantidade de transplantes em cada um dos cenários, os quais são apresentados na tabela 25.

A tabela 25 mostra uma variação do número de transplantes quase na mesma medida da variação de fígados. Como houve pouca variação na quantidade de óbitos, mas a quantidade de transplantes aumentou, a hipótese é de que o tamanho inicial da fila estava provendo pacientes suficientes para que a quantidade de óbitos pré-transplante não diminuísse no horizonte simulado.

Para verificar quais seriam os resultados se as simulações fossem executadas sem considerar o tamanho inicial da fila, foi necessário obter novos valores como referência.

Tabela 25: Efeito no número de transplantes variando a disponibilidade de fígados

Disponibilidade de fígados	Disciplinas			
	<i>pior-primeiro</i>	<i>melhor-primeiro</i>	PEPS	Aleatório
+0%	-0,23%	-0,87%	-3,16%	-0,20%
+20%	19,24%	22,20%	22,42%	21,98%
+40%	38,84%	40,75%	40,25%	39,18%
+60%	62,81%	57,35%	57,53%	58,48%
+80%	79,30%	77,27%	83,23%	78,73%
+100%	100,98%	97,08%	97,92%	101,27%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 15.

Para isso, foram executadas cinco simulações reproduzindo o cenário apresentado pela tabela 12 com exceção da “Quantidade inicial de pacientes na fila” que recebeu o valor 0.

Os valores médios dos resultados, apresentados na tabela 26, foram considerados a referência para a comparação dos resultados da variação da oferta de fígados em um cenário hipotético com uma fila de tamanho inicial igual a zero.

Tabela 26: Valores de referência em um cenário hipotético de uma fila de tamanho inicial zero

Indicador	Número de Pacientes
Melhora	2
Óbito pré-transplante	75
Abandono	103

Fonte: [DADOS DA PESQUISA]

Seguindo o mesmo processo apresentado nos passos anteriores, simulações foram executadas, as *diferenças* calculadas. Os resultados são apresentados pela tabela 27.

Tabela 27: Disciplina *pior-primeiro* - *Diferença* de óbitos pré-transplante e transplantes em função da variação da disponibilidade de fígados na fila inicial igual a zero

Disponibilidade de fígados	Indicadores de Comparação	
	Óbitos pré-transplante	Transplantes
+0%	0%	0%
+20%	-1,94%	19,42%
+40%	-0,76%	40,85%
+60%	-1,63%	59,82%
+80%	-8,66%	76,96%
+100%	-16,84%	103,47%

Fonte: [DADOS DA PESQUISA] confrontado com a tabela 26

Os dados apresentados pela tabela 27 indicam que o número de transplantes segue o mesmo comportamento apresentado na tabela 25, mas a quantidade de óbitos apresenta

um tendência de redução a partir do aumento de 60% na oferta de fígados. Essa tendência pode ser melhor visualizada no gráfico apresentado pela figura 15.

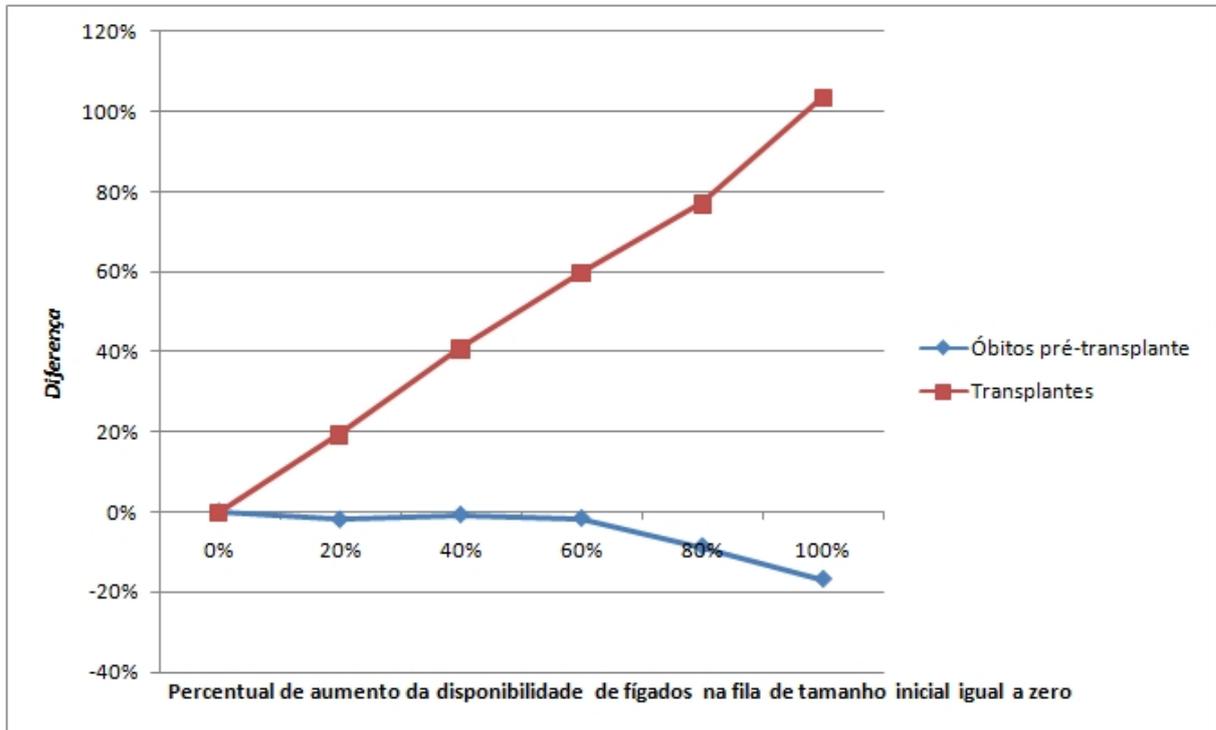


Figura 15: Disciplina *pior-primeiro* - *Diferença* de óbitos pré-transplante e transplantes em função da variação da disponibilidade de fígados na fila inicial igual a zero, baseado nos dados da tabela 27

4.4 Análise dos Resultados

4.4.1 Modelo de Simulação

O processo de calibração alcançou seu objetivo uma vez que os dados apresentados sugerem que o simulador alcançou resultados próximos da realidade, conseguindo reproduzir o cenário real definido como referência.

Quanto aos aspectos de implementação do modelo, é interessante observar que, neste capítulo, foram abordados desde cenários simples até cenários mais complexos. Nesses, o modelo de simulação se mostrou capaz de capturar e reproduzir detalhes deixando o modelo mais próximo da realidade.

É importante ressaltar que o simulador permite facilmente a inclusão de outros detalhes, ou seja, contanto que existam informações disponíveis e objetivas sobre um dado cenário, é possível inseri-las no modelo. Essa versatilidade do modelo permite que

ele se torne gradativamente mais completo e com capacidade de reproduzir cenários cada vez mais complexos.

4.4.2 *Experimentos*

A execução de cada simulação, com exceção da fila inicial de tamanho igual a zero que foi mais rápida, durou em média 1 minuto e 40 segundos.

Além das informações utilizadas na interpretação dos resultados dos experimentos, outras informações sobre as simulações foram coletadas e armazenadas e, embora não tenham sido consideradas neste trabalho, poderiam ser analisadas para contribuir para um melhor entendimento dos resultados e dos problemas. Essas informações incluem totais como a quantidade de fígados perdidos, bem como informações detalhadas *tick a tick* dos fígados, dos pacientes na fila de espera e no acompanhamento pós-transplante e da fila de espera, conforme descrito na subseção 4.1.1.3.

Entretanto, qualquer investigação mais profunda da diferença entre as políticas de prioridade, bem como de qualquer outra questão abordada nesta seção, embora importante para maior compreensão dos problemas relacionados ao processo de alocação de fígado em uma fila de transplantes, extrapola o escopo deste trabalho de construir um modelo de simulação dessa fila.

Portanto, é importante ressaltar que os experimentos realizados e apresentados neste trabalho não tiveram a pretensão de estudar a fundo o problema da fila de transplantes. O objetivo dos experimentos foi submeter o simulador a testes e ilustrar como ele poderia ser utilizado em cenários reais.

Diante disso, o resultado dos experimentos indicou um comportamento satisfatório do simulador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Visão Geral e Contribuições do Trabalho

Esta pesquisa se interessou pela utilização das filas na organização de pacientes à espera de um transplante de fígado, considerando os problemas que advêm do processo de tomada de decisão sobre a definição de sua política de ordenação chamada aqui de disciplina.

Buscando contribuir para o estudo desse problema, neste trabalho, foi desenvolvido o modelo de simulação baseado em agentes de uma fila de transplantes de fígado, utilizando o arcabouço gratuito de código aberto *Repast*.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi considerado o escopo delineado pelas seguintes definições:

- O modelo buscou reproduzir o processo de transplante de fígado descrito em 2.2.2 a partir do momento em que o fígado já está disponível para o transplante até o acompanhamento dos pacientes no pós-transplante;
- Com exceção dos fígados e pacientes, o modelo considera os demais recursos disponíveis e não restritivos;
- O modelo considerou que um fígado atenda apenas um paciente;
- O modelo considerou apenas pacientes adultos;
- Neste modelo, um *tick* representa um dia de simulação.

Considerando os elementos básicos que descrevem um sistema de filas, destacados em (GROSS; HARRIS, 1998) e apresentados na seção 2.1, para a implementação do modelo foram feitas as seguintes definições:

- Padrão de chegada dos clientes: o padrão de chegada de pacientes e fígados no sistema de filas é representado pela distribuição de *Poisson*;

- Padrão de atendimento dos servidores: cada serviço atende um paciente e o tempo de serviço é pré-determinado e igual para todos os serviços;
- Disciplina da fila: as disciplinas implementadas foram: *pior-primeiro*, *melhor-primeiro*, *PEPS* e *aleatório*;
- Capacidade do sistema: o sistema possui capacidade infinita, ou seja, não há restrição quanto ao tamanho da fila de espera. Ela é capaz de receber uma quantidade infinita de pacientes;
- Número de canais de atendimento: Uma vez que toda a estrutura necessária ao transplante não é considerada recurso escasso, não há restrição na quantidade simultânea de serviços;
- Número de estágios do serviço: o serviço (transplante) é realizado em apenas um estágio.

Cada componente do processo - o paciente, o fígado, o sistema de filas, o transplante, as fontes de pacientes e fígados e o acompanhamento pós-transplante - foi modelado como um agente. Essa abordagem permitiu caracterizar detalhes do processo em uma granularidade mais fina. A partir do comportamento e das propriedades dos agentes nas fases do processo e em diferentes estados de saúde, a fila de transplantes é simulada.

O valor do MELD do paciente tem duas funções principais no modelo. A primeira função do MELD está relacionada ao estado de saúde do paciente. O MELD evolui conforme a atuação da doença que acomete o paciente e o risco do paciente falecer é medido em função do seu MELD. A segunda função está relacionada às disciplinas aplicadas para a ordenação da fila nas políticas que consideram o MELD, ou seja, as disciplinas *pior-primeiro* e *melhor-primeiro*.

Na execução de uma simulação, o modelo recebe *dados de entrada*, processa-os através da dinâmica dos agentes que se baseiam em *parâmetros* e gera *dados de saída*.

Antes que se pudesse utilizar o simulador em experimentos, foi necessário calibrá-lo. No início do processo de calibração, os valores dos *parâmetros* foram obtidos a partir de um cenário real e fornecidos ao modelo. Também foram obtidos os valores dos *dados de entrada* que serviram de insumo para o simulador e os valores dos *dados de referência* que, após o término da simulação, foram comparados aos *dados de saída* do simulador. Durante o processo de calibração, os valores dos *parâmetros* foram ajustados até que a

diferença entre os *dados de saída* e os *dados de referência* estivesse dentro de uma margem aceitável.

Um vez calibrado o simulador, foram realizados experimentos exploratórios. Os experimentos realizados nesta pesquisa tiveram um cunho demonstrativo, ou seja, foram realizados com o objetivo de ilustrar situações em que o modelo de simulação poderia ser utilizado. Para esses experimentos, *indicadores de comparação* foram definidos e medidos com a intenção de comparar o desempenho da fila utilizando cada uma das disciplinas e verificar o impacto na quantidade de óbitos e de transplantes em função do aumento da oferta de fígados.

Os resultados obtidos nos experimentos, de uma forma geral, apresentaram o comportamento esperado. A interpretação mais detalhada de alguns resultados demandaria um estudo mais aprofundado do problema, indo além da construção do modelo de simulação. Esse esforço, embora importante em uma outra fase, extrapola o escopo desta pesquisa.

Os experimentos demonstraram a capacidade do modelo em capturar detalhes da realidade e reproduzir cenários definidos. Além disso, o modelo permite ser estendido, conforme a necessidade, para representar cenários mais complexos.

A implementação do simulador seguiu um projeto orientado a objetos tradicional, no qual foram utilizadas técnicas e padrões de desenvolvimento de sistemas bem conhecidos. Esse desenho torna simples o entendimento do código e facilita a sua manutenção. A implementação das classes que representam cada agente encerra os algoritmos e parâmetros responsáveis por seu processo de tomada de decisão, tornando mais fácil qualquer alteração. Essas características do simulador foram percebidas durante o seu desenvolvimento quando as características e o comportamento de cada agente foram implementados de maneira iterativa e incremental.

Geralmente, investe-se em tecnologia para melhorar processos e aumentar a produtividade e utiliza-se indicadores financeiros para medir os resultados. Sob esse aspecto, este trabalho pode ajudar os gestores a aplicar melhor os recursos disponíveis e a tomarem melhores decisões diante de diferentes cenários e de uma forma mais aderente à sua realidade.

Entretanto, na área médica, um bom resultado não está associado apenas a valores financeiros. Além do aspecto financeiro, há outros indicadores importantes como qualidade de vida e quantidade de óbitos. Segundo (BARROS; LEHFELD, 1990), uma pesquisa

tem como preocupação racionalizar esforços e tempo na produção de bens, na implantação de serviços e descobertas de elementos que contribuam para a melhoria das condições de vida das populações. Nesse aspecto, este modelo pode contribuir para melhorar a qualidade de vida da população e até minimizar perdas humanas.

O objetivo proposto neste trabalho foi alcançado, uma vez que o modelo de simulação foi desenvolvido, calibrado e utilizado em alguns experimentos com resultados satisfatórios.

5.2 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram percebidas oportunidades de extensão do modelo, as quais são apresentadas nesta seção.

É interessante observar que, quanto ao simulador, a implementação dessas propostas é considerada viável.

5.2.1 O Modelo de Simulação

Nesta pesquisa, a verificação da compatibilidade por tamanho entre fígado e paciente foi discretizada em três valores: grande, médio e pequeno. Para alcançar um nível maior de detalhe, deveria ser utilizado o critério de percentual por IMC (Índice de Massa Corporal), diâmetro antero posterior do tórax e abdômen do doador e do receptor. Para isso, seria necessário substituir o atributo *tamanho* por *imc*, *daptotax* e *dabdomen*, tanto no agente fígado, como no agente paciente. Além disso, a distribuição estatística desses atributos na população precisa ser levantada para alimentar as fontes que preencherão os valores desses atributos no fígado e no paciente no momento da criação do agente.

(HOWARD, 2001) sugere relações entre a sobrevida do enxerto no paciente transplantado e o tempo de espera desse paciente pelo transplante. Segundo Ioannu¹, citado por (LIMA, 2006), um sistema de alocação de órgãos perfeito deveria, em teoria, minimizar a mortalidade e as exclusões da lista de espera e maximizar a sobrevida pós-transplante. Portanto, poderia deslocar-se o risco de falha do enxerto do paciente para o fígado conforme o valor do MELD do receptor no momento do transplante. Para isso, poderia ser implementado um comportamento para o *fígado* no estado “utilizado”, conforme descrito na subseção 3.2.3, onde ele avaliaria sua saúde e decidiria, probabilisticamente, falhar ou não, influenciando o estado de saúde do paciente transplantado.

¹Ioannu GN. *Liver Transplant* 13:937, 2007.

Além do *tamanho* e do *tipo sanguíneo*, outros critérios de alocação poderiam ser criados para testar hipóteses quanto à idade do doador, doença do paciente receptor ou qualquer outro aspecto considerado relevante.

Enfim, seria interessante inserir no modelo alguma capacidade de aprendizagem para que o sistema possa, por exemplo, definir as melhores formas de organização da fila para obter melhor eficiência do processo. Uma sugestão de implementação dessa proposta seria a criação de um agente dotado de um mecanismo que seja capaz de analisar os *dados de entrada* da simulação e definir qual seria a melhor disciplina a ser utilizada, reavaliando sua decisão através da análise periódica dos *dados de saída* da simulação.

5.2.2 *Parâmetros e Experimentos*

O submodelo de evolução do MELD foi definido arbitrariamente neste modelo e poderia ser ajustado baseado em dados reais. A primeira opção seria o levantamento desses dados a partir das informações da fila de transplantes de fígado de Belo Horizonte. A segunda opção seria inferir esses dados a partir do gráfico apresentado pela figura 1 em (OTON-NIETO et al., 2005).

Entretanto, é desejável que a evolução do MELD não seja um valor global obtido a partir de um comportamento médio, mas seja definida de forma distinta por cada doença. Essa implementação enriqueceria o modelo. É importante ressaltar que o modelo já está preparado para se comportar dessa maneira, bastando apenas o levantamento dessas informações.

Para a alimentação dos valores dos *parâmetros* do simulador, foi utilizada uma compilação de dados oriundos de diferentes localidades. Se isso deixa o modelo mais genérico, por outro lado, utilizar apenas as informações de uma mesma localidade poderia torná-lo mais ajustado a um cenário específico, a ponto de poder capturar detalhes regionais representados por fatores genéticos, culturais e de infra-estrutura, entre outros.

Certas perturbações (*mutação-like*) poderiam ser inseridas no modelo, na tentativa de promover uma descoberta de conhecimento. Um exemplo disso, poderia ser a inclusão no modelo de uma ação aleatória ou probabilística para transplantar um determinado paciente da fila baseado em um critério pré-definido e desconsiderando a disciplina vigente. Esse comportamento poderia simular a atuação de um especialista em uma decisão *ad-hoc*, baseado em sua experiência.

Nessa mesma linha, poderia ser realizada uma análise de sensibilidade no modelo

para entender quais seriam os seus pontos mais sensíveis, ou seja, aqueles parâmetros cujos valores devem ser mais criteriosamente definidos pois uma pequena variação implica em uma grande variação no resultado da simulação. O submodelo de evolução do MELD pode ser um candidato para esse experimento.

Dentre os pesquisadores dos problemas relacionados à fila de transplantes de fígado, estão aqueles que se dedicam aos fatores econômicos. Axelrod², citado por (LIMA, 2006), afirma que o aumento do valor do MELD associa-se à elevação dos custos. Segundo (JORNAL O TEMPO,), “no primeiro ano após a cirurgia, o paciente transplantado de fígado fica imunodeprimido, e o risco de rejeição ou infecção é grande. O SUS paga R\$1.691 pela reinternação após transplante, mas os medicamentos utilizados nesses casos podem variar de R\$40 mil a R\$60 mil”. Diante disso, uma proposta de extensão deste modelo seria utilizá-lo para a análise da fila sob o aspecto econômico, associando os resultados da simulação ao custo envolvido no processo dos transplantes.

Enfim, é importante ressaltar que o escopo desta pesquisa limitou-se à construção do modelo de simulação. Embora alguns experimentos tenham sido realizados, eles não tiveram a pretensão de fornecer respostas ao problema das políticas de alocação da fila de transplantes, mas de ilustrar como o modelo pode ser utilizado para ajudar a alcançá-las. Com o apoio de pesquisadores envolvidos com o problema da fila de transplantes, outros experimentos podem ser planejados com o objetivo de utilizar este modelo de simulação como uma ferramenta de apoio no estudo e análise do problema de alocação *fígado-paciente*.

Dessa forma, outros cenários poderão ser definidos e o uso do modelo, através de simulações computacionais, poderá apresentar relações ainda não formuladas. Essas descobertas podem ajudar a alcançar uma melhor compreensão do processo e dos fatores que o influenciam e determinam sua eficiência.

Portanto, no que tange à aplicabilidade do modelo, é importante enfatizar que é desejável que sua evolução seja catalisada e orientada por necessidades identificadas, principalmente, por pesquisadores das Ciências Médicas. Diante disso, pretende-se trabalhar em conjunto com pesquisadores dessa área, que poderão propor, com mais propriedade, problemas a serem analisados com a ajuda do simulador.

²Axelrod D.A et al. Am J Transplant 2005; 5: 2297-2301.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. J. de. *Modelo e simulação multiagente de uma população de mosquitos Aedes aegypti*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.
- AMERICAN RED CROSS. *If your blood type is...* Página internet. Disponível em: <<http://chapters.redcross.org/br/northernohio/INFO/bloodtype.html>>. Acesso em: 13/01/2010.
- BARROS, A. J.; LEHFELD, N. A. S. *Projeto de pesquisa: propostas metodológicas*. [S.l.]: Vozes, 1990. 29 – 35 p.
- BERTOLI, M.; CASALE, G.; SERAZZI, G. Java modelling tools: an open source suite for queueing network modelling and workload analysis. In: *Proceedings of QEST 2006 Conference*. [S.l.]: IEEE Press, 2006. p. 119 – 120.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. [S.l.]: Wiley, 1987.
- COLLUCCI, C. *Nova regra da fila do fígado reduz morte de crianças*. 2007. Página internet. Disponível em: <http://www.crmmg.org.br/Noticias/Saude/news_item.2007-04-13.1772311868>. Acesso em: 25/11/2007.
- DINSOREANU, M.; SALOMIE, I.; PUSZTAI, K. On the design of agent-based systems using uml and extensions. In: *Information Technology Interfaces IT1*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 205–210.
- FREEMAN, R. B. et al. The new liver allocation system: moving toward evidence-based transplantation policy. *Liver transplantation : official publication of the American Association for the Study of Liver Diseases and the International Liver Transplantation Society*, Wiley InterScience, v. 8, p. 851–858, sep 2002. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/106593619/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>>.
- GROSS, D.; HARRIS, C. M. *Fundamentals of Queueing Theory (Wiley Series in Probability and Statistics)*. Wiley-Interscience, 1998. Hardcover. Disponível em: <<http://www.amazon.ca/exec/obidos/redirect?tag=citeulike09-20&path=ASIN/0471170836>>.
- GRUPO DE HEPATOLOGIA & TRANSPLANTE DE FÍGADO. *Processo do Transplante*. Página internet. Disponível em: <http://www.transplantedefigado.com.br/site_/index.php>. Acesso em: 12/01/2010.
- HEMOMINAS. *Distribuição de tipos sanguíneos*. Página internet. Fundação de Hematologia e Hemoterapia de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.hemominas.mg.gov.br/hemominas/menu/cidadao/doacao/informacao_doacao_sangue.html>. Acesso em: 14/03/2010.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to Operations Research*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2004.

HOSPITAL MERIDIONAL. *Manual do Candidato ao Transplante Hepático*. Página internet. Dr. Isaac Walker de Abreu - Cirurgia do Aparelho Digestivo. Disponível em: <<http://drisaacwalker.site.med.br/fmfiles/index.asp/::XPR20D::/Manual%20do%20Candidato%20ao%20Transplante%20Hep%C3%A1tico.pdf>>. Acesso em: 27/10/2009.

HOWARD, D. H. Dynamic analysis of liver allocation policies. *Medical Decision Making*, Sage Publications, v. 21, n. 4, p. 257–266, 2001. Disponível em: <<http://mdm.sagepub.com/cgi/content/abstract/21/4/257>>.

HUGET, M.-P. Agent uml notation for multiagent system design. *IEEE Internet Computing*, July 2004.

HUO, T.-I. et al. Different model for end-stage liver disease score block distributions may have a variable ability for outcome prediction. *Transplantation*, Lippincott Williams & Wilkins, v. 80, n. 10, p. 1414–1418, 2005. <http://www.transplantjournal.com/pt/re/transplantation/abstract.00007890-200511270-00010.htm>.

IGLESIAS, F.; GÜNTHER, H. Normas, justiça, atribuição e poder: uma revisão e agenda de pesquisa sobre filas de espera. *Estudos de Psicologia*, v. 12, n. 1, p. 03–11, 2007.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, p. 7–38, October 1998.

JORNAL O TEMPO. “Reinternação ‘explode’ custos”. Página internet. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/otempo/noticias/?IdEdicao=1433&IdCanal=7&IdSubCanal=47>>. Acesso em: 27/10/2009.

KOHLER, T. A. et al. Simulating ancient societies: Computer modeling is helping unravel the archaeological mysteries of the american southwest. *Scientific American*, July 2005.

LANDER, S. E. Issues in multiagent design systems. *IEEE Expert*, p. 18–26, 1997.

LIMA, A. S. Três anos de experiência com o meld no brasil. In: *XI Congresso Brasileiro de Transplante - VIII Congresso Luso-Brasileiro de Transplante*. [S.l.: s.n.], 2006. Apresentação PowerPoint.

LOPES, C. L. do V. *Modelo de simulação de centrais de teleatendimento baseado em sistemas multiagentes*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: *Winter Simulation Conference*. [S.l.: s.n.], 2005.

MAES, P. Artificial life meets entertainment: Lifelike autonomous agents. *Communications of ACM*, v. 38, n. 11, p. 108–114, November 1995.

MAHMOUD, Q. H.; MAAMAR, Z. Applying the mvc design pattern to multi-agent systems. *IEEE*, p. 2420–2423, May 2006.

Ministério da Saúde. *Gravidade do estado do paciente é o novo critério para a fila de espera*. 2006. Página internet. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/aplicacoes/noticias/noticias_detalhe.cfm?co_seq_noticia=27255>. Acesso em: 25/11/2007.

Ministério da Saúde. *Portaria nº 1.160*. maio 2006. Página internet. Disponível em: <<http://dtr2001.saude.gov.br/sas/PORTARIAS/Port2006/GM/GM-1160.htm>>. Acesso em: 10/01/2010.

Ministério da Saúde. *Saúde lança campanha para incentivar a doação de órgãos*. 2007. Página internet. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/aplicacoes/noticias/noticias_detalhe.cfm?co_seq_noticia=36637>. Acesso em: 23/11/2007.

MOTTA, B.; INÁCIO, P.; ROSA, A. Simulação da evacuação de um edifício. In: *4º Encontro do Colégio de Engenharia Electrotécnica - ENCEE*. Lisboa, Portugal: [s.n.], 1999. p. 27–33.

OPTN. *2007 Annual Report - Waiting List Patient Characteristics at End of Year - Liver Waiting List - Active Waitlist Patients, 1997 to 2006*. Página internet. <http://optn.transplant.hrsa.gov/AR2007.exe> - AR2007/901a_canhx-stat-cd_li.htm. Disponível em: <<http://optn.transplant.hrsa.gov/data/annualReport.asp>>. Acesso em: 09/12/2009.

OTON-NIETO, E. et al. Variability of meld score during the year before liver transplantation. In: *Transplantation Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 37, p. 3887 – 3888.

PARUNAK, H. V. D.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. In: *Multi-agent systems and Agent-based Simulation (MABS'98)*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 10–25.

PRÓ-FÍGADO. *Re-Transplante*. Página internet. Disponível em: <<http://www.pro-figado.com.br/conteudo/publicacoes.asp?id=295>>. Acesso em: 20/12/2009.

RAILSBACK, S. F.; LYTINEN, S. L.; JACKSON, S. K. Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation*, Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, v. 82, n. 9, p. 609–623, 2006.

RALAMBONDRAIN, T.; COURDIER, R.; PAYET, D. An ontology for observation of multiagent based simulation. In: *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. [S.l.: s.n.], 2006.

ROSA, W.; FERREIRA, R. M. P.; OLIVEIRA, A. F. de. Análise de uma fila de pacientes para transplante de fígado. Baseado em dados fornecidos pelo coordenador do Instituto Alfa de Gastroenterologia do Hospital das Clínicas de Belo Horizonte. 2009.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1995.

SANCHEZ, S. M.; LUCAS, T. W. Exploring the world of agent-based simulations: Simple models, complex analyses. In: *Winter Simulation Conference*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 116–126.

SANDHOLM, T. *Multi-agent Systems: A Modern Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. [S.l.]: MIT Press, 1999. 201 – 258 p.

SIST. EST. DE TRANSP. S.P. *CENSO 2007 - Transplantes de Fígado no Estado de São Paulo*. Página internet. Secretaria de Estado da Saúde do Estado de São Paulo - Sistema Estadual de Transplantes. Disponível em: <http://www.saude.sp.gov.br/resources/gestor/informacoes_de_saude/transplantes_em_dados/censo2007/censo_2007_figado.pdf>. Acesso em: 07/02/2010.

SIST. EST. DE TRANSP. S.P. *CENSO 2008 - Transplantes de Fígado no Estado de São Paulo*. Página internet. Secretaria de Estado da Saúde do Estado de São Paulo - Sistema Estadual de Transplantes. Disponível em: <http://www.saude.sp.gov.br/resources/gestor/informacoes_de_saude/transplantes_em_dados/censo_2008/censo_figado_2008.pdf>. Acesso em: 20/12/2009.

TENG, Y.; KONG, N. Applying agent-based modeling and simulation (abms) to the u.s. organ transplantation and allocation network. In: *3rd INFORMS Workshop on Data Mining and Health Informatics (DM-HI 2008)*. [S.l.]: J. Li and D. Aleman and R. Sikora, 2008. p. 331–338. <http://morlab.mie.utoronto.ca/DMHI2008/workshoppapers.php>.

THOMPSON, D. et al. Simulating the allocation of organs for transplantation. In: *Health Care Management Science 7*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 331–338. <http://hdl.handle.net/2027.42/45816>.

VALADÃO, F. M. *Simulação multiagente de uma economia do insumo-produto e de políticas de seleção de fornecedor*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

WEISS, G. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, 2000. Paperback. Disponível em: <<http://www.amazon.ca/exec/obidos/redirect?tag=citeulike09-20&path=ASIN/0262731312>>.

WIKIPEDIA. *Grupo Sanguíneo*. Página internet. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Grupo_sangu%C3%ADneo>. Acesso em: 20/12/2009.

WU, J.; SCHULZ, N. N.; GAO, W. Agent-based distributed simulation. *IEEE*, 2006.