

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

HENRIQUE PINTO DOS SANTOS ZAIDAN

**ANÁLISE DA GARANTIA ESTENDIDA PARA
EQUIPAMENTOS HOSPITALARES: UMA ABORDAGEM
VIA TEORIA DOS JOGOS E PROCESSO DE
RENOVAÇÃO GENERALIZADO**

Recife
2016

HENRIQUE PINTO DOS SANTOS ZAIDAN

**ANÁLISE DA GARANTIA ESTENDIDA PARA
EQUIPAMENTOS HOSPITALARES: UMA ABORDAGEM
VIA TEORIA DOS JOGOS E PROCESSO DE
RENOVAÇÃO GENERALIZADO**

Dissertação de Mestrado apresentada à
UFPE para a obtenção de Mestre como
parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção
(Área de Pesquisa Operacional).

Orientador: Márcio José das Chagas
Moura, Doutor.

Recife
2016

Z21a	Zaidan, Henrique Pinto dos Santos. Análise da garantia estendida para equipamentos hospitalares: uma abordagem via teoria dos jogos e processo de renovação generalizado / Henrique Pinto dos Santos. 2016. 74 folhas, il. Orientador: Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2016. Inclui Referências. 1. Engenharia de Produção. 2. Jogo de Stackelberg. 3. Processo de renovação generalizado. 4. Reparo imperfeito. 5. Garantia estendida. 6. Equipamentos hospitalares. I. Moura, Márcio José das Chagas (Orientador). II. Título. UFPE 658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2016-116
------	--

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
HENRIQUE PINTO DOS SANTOS ZAIDAN

Análise da Garantia Estendida Para Equipamentos Hospitalares: Uma
Abordagem Via Teoria Dos Jogos E Processo De Renovação
Generalizado

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Pesquisa Operacional

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **HENRIQUE PINTO DOS SANTOS ZAIDAN**, **APROVADO.**

Recife, 19 de fevereiro de 2016.

Prof. MÁRCIO JOSÉ DAS CHAGAS MOURA, Doutor (UFPE)

Prof. ISIS DIDIER LINS, Doutora (UFPE)

Prof. ALEXANDRE STAMFORD DA SILVA, Doutor (UFPE)

“You know what a champion is? A champion is someone who’s ready when the gong rings – not just before, not just after – but when it rings.” Jack Dempsey, foi o Campeão Mundial dos pesos-pesados de boxe entre 1919 e 1926.

RESUMO

A terceirização da manutenção e a adesão da garantia estendida para equipamentos hospitalares tem se tornado uma tendência ao longo das últimas décadas, pois estão relacionadas com a crescente complexidade e modernização dos dispositivos médicos, bem como, com a recorrente prática da exclusividade do fabricante na realização da manutenção. Geralmente, o relacionamento entre a instituição de saúde e o fabricante é conduzido por meio de um documento, especificando questões como: nível de confiabilidade, desempenho operacional, disponibilidade, duração da garantia, preço da manutenção, penalidades e a política de manutenção a ser implementada. Sendo assim, a presente dissertação estuda quantitativamente o problema de garantia estendida para equipamentos hospitalares, por meio da junção de duas ferramentas: o jogo de Stackelberg, designado para estruturar a forma de relacionamento entre as empresas, e o Processo de Renovação Generalizado, responsável processo de falha – reparo do equipamento (reparo imperfeito). Um cenário foi criado para a aplicação de tais métodos. Inicialmente, o fabricante ao vender um equipamento hospitalar também oferece duas possibilidades para a execução da manutenção: a primeira, garantia estendida, e a segunda, serviço sob demanda. Posteriormente, a decisão do hospital é influenciada pela estrutura de preços imposta do fabricante, a confiabilidade do equipamento e o seu grau de aversão ao risco, visto que as falhas do dispositivo são eventos aleatórios. Para ilustrar tal situação, realiza-se um exemplo numérico com dados de falha e reparo de um Angiográfico. O equilíbrio do modelo implica na maximização do lucro esperado do fabricante e o hospital decidindo pela adesão da garantia estendida. Adicionalmente, comparando as soluções do reparo imperfeito com os cenários de reparos perfeito e mínimo, observou-se similaridade nas estratégias para os casos de reparos imperfeito e perfeito, enquanto que, na relação entre os reparos imperfeito e mínimo as estratégias dar-se-ão de maneira oposta. Finalmente, o lucro esperado do fabricante diminui conforme aumenta o número médio de falhas.

Palavras-Chave: Jogo de Stackelberg. Processo de Renovação Generalizado. Reparo Imperfeito. Garantia Estendida. Equipamentos Hospitalares.

ABSTRACT

The outsourcing of maintenance and the acquisition of extended warranty for hospital equipment has become a trend over the past few decades, since they are related to the growing complexity, modernization of medical devices and the recurring practice of the manufacturer's exclusivity in performing maintenance services. Generally, the relationship between the health institution and the manufacturer is conducted through a document specifying the following issues: level of reliability, operating performance, availability, warranty period, maintenance price, penalties and maintenance policy to be implemented. Under these circumstances, this thesis analyzes the problem of the extended warranty for clinical equipment by joining two tools: the Stackelberg game, designed to model the relation between companies and the Generalized Renewal Process, employed for modeling failure-repair process (imperfect repair). A scenario was created for the application of such methods. Initially, the manufacturer intends to sell a medical equipment and also offers two maintenance possibilities: first, an extended warranty, and second, maintenance services on demand. Subsequently, the hospital's decision is influenced by manufacturer's price structure, equipment reliability and the degree of risk aversion, since the failures occurrences of the device are random events. To illustrate this situation, an application example with failure and repair data of an Angiography equipment is presented. The equilibrium of model implies in expected profit maximization for the manufacturer and hospital chooses the extended warranty option. In addition, by comparing the solutions of the imperfect repair with perfect and minimal repair scenarios, a similarity in the strategies adopted in cases of imperfect and perfect repairs was observed, while the strategies were opposite when comparing imperfect and minimal repairs. Finally, the expected profit of the manufacturer decreases as the average number of failures increases.

Keywords: Stackelberg Game. General Renewal Process. Imperfect Repair. Extended Warranty. Hospital Equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Árvore do Jogo Sequencial na Forma Estendida	22
Figura 2.2- Relação entre a Função Utilidade e os Diferentes Perfis de Risco	28
Figura 2.3- Excedente do Consumidor	29
Figura 2.4- Excedente do Produtor	29
Figura 2.5- Relação entre Intensidade de Falha e Idade do Equipamento	31
Figura 2.6- Relação entre a Idade Real e Virtual Inter-Relacionada com a Variação do Parâmetro de Rejuvenescimento	32
Figura 2.7-Fluxograma para a obtenção dos EMV's.....	36
Figura 2.8- Fluxograma Descrevendo os Algoritmos para Estimar os Tempos entre Falhas (à esquerda) e o Número Esperado de Falhas (à direita)	37
Figura 2.9- Relação entre a Utilidade com o Parâmetro de Aversão ao Risco.....	44
Figura 2.10- Plano P – Cs.....	46
Figura 3.1- Linha do Tempo do Jogo Proposto	50
Figura 3.2--Relação entre a FDP da Weibull com o β	51
Figura 3.3- Árvore do Jogo de Stackelberg entre o Fabricante e o Hospital.....	54
Figura 4.1- Fluxograma para o Cálculo do Tempo de Reparo Excedente	58
Figura 4.2 - Comparação entre os tempos de falha acumulados simulados e reais.....	59
Figura 4.3 - Plano P – Cs do Hospital	60
Figura 4.4- Relação entre os Preços de Reserva do Hospital e os Processos Estocásticos	63
Figura 4.5- Relação entre o Lucro do Fabricante e os Processos Estocásticos	64
Figura 4.6- Relação entre o Preço de Reserva do Hospital para a Garantia Estendida e o Coeficiente de Aversão ao Risco.....	65
Figura 4.7- Relação entre o Preço de Reserva do Hospital para o Serviço sob Demanda e o Coeficiente de Aversão ao Risco.....	66
Figura 4.8- Relação entre o Lucro do Fabricante e o Parâmetro de Aversão ao Risco..	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Representação Matricial de um Jogo Normal	20
Tabela 3.1- Relação entre o Jogo de Stackelberg e o Modelo de Garantia Estendida ...	54
Tabela 4.1- Parâmetros do Exemplo Numérico.....	59
Tabela 4.2- Comparação dos Resultados entre o Reparo Imperfeito e o Reparo Perfeito	61
Tabela 4.3- Comparação dos Resultados entre os Reparos Imperfeito e Mínimo	62
Tabela 4.4- Comparação das Estratégias entre os Reparos Perfeito, Imperfeito e Mínimo	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMV's – Estimadores de Máxima Verossimilhança

FDP – Função de Densidade de Probabilidade

MTBF – Tempo Médio entre Falhas

PHP – Processo Homogêneo de Poisson

PNHP – Processo não Homogêneo de Poisson

PR – Processo de Renovação

PRG – Processo de Renovação Generalizado

VA – Variável Aleatória

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações iniciais	13
1.2	Justificativa e contribuição do estudo	15
1.3	Objetivos	17
1.4	Estrutura do trabalho	18
2	ENQUADRAMENTO TEÓRICO	19
2.1	Teoria dos jogos	19
2.1.1	Elementos da teoria dos jogos	19
2.1.2	Representação do jogo	20
2.1.3	Jogos não cooperativos	22
2.2	Conceitos microeconômicos	27
2.2.1	Utilidade	27
2.2.2	Excedentes do consumidor e produtor	28
2.3	Processos estocásticos	30
2.3.1	Processo de renovação e processo (PR) não homogêneo de Poisson (PNHP)30	
2.3.2	Processo de Renovação Generalizado	32
2.4	Terceirização da manutenção	37
2.4.1	Terceirização da manutenção de equipamentos hospitalares	38
2.4.2	Concepção dos contratos de manutenção e o papel da garantia	39
2.4.3	Modelagem matemática de um contrato de manutenção	42
3	APRESENTAÇÃO DO MODELO	49
3.1	Descrição do problema	49
3.2	Hipóteses do modelo	50

3.3	Utilização da distribuição Weibull nos tempos entre falhas do equipamento hospitalar	51
3.4	Problema de decisão do hospital	52
3.5	Problema de decisão do fabricante	52
3.6	Resolução do problema por meio do jogo de Stackelberg	53
4	ANÁLISE DO MODELO	56
4.1	Estratégia ótima do hospital	56
4.2	Estratégia ótima do fabricante	56
4.3	Cálculo do tempo excedente de reparo	57
4.4	Exemplo numérico	58
4.4.1	Extensões do trabalho	61
5	CONCLUSÕES.....	67
5.1	Modelo para a manutenção de equipamentos hospitalares.....	68
5.2	Sugestão de trabalhos futuros	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O atual panorama das economias capitalistas é caracterizado pelo surgimento constante de novas tecnologias de produção, assídua concorrência entre as empresas, aparecimento de produtos mais sofisticados e uma pressão dos consumidores para bens com elevados níveis de qualidade. Essa situação implica numa contínua busca por novas estratégias, no intuito das empresas permanecerem competitivas em suas áreas de atuação. Logo, as ações de manutenção apresentam um papel estratégico dentro das organizações, uma vez que estão relacionadas no controle da intensidade de falha e no desempenho operacional do equipamento.

Desta forma, a manutenção, segundo a norma do *European Standard* (2001), é definida como a combinação de todas as ações administrativas, técnicas e gerenciais de um determinado item (peça, componente, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema) ao longo de sua vida útil, visando a sua preservação ou a restauração para um estado capaz de desempenhar as suas funções requeridas (estado operacional). Adicionalmente, Manzini *et al.* (2010) afirmam que a manutenção deve projetar, organizar, implementar e verificar o trabalho do sistema a fim de garantir o seu funcionamento nominal durante o *uptime* (tempo de trabalho) e minimizar o *downtime* (intervalo de paradas) causado por quebras ou processos de reparo.

A manutenção, dentro do contexto hospitalar, apresenta características especiais: primeiro, a entrega de um bom serviço médico é diretamente relacionada à posse de equipamentos e dispositivos clínicos, os quais devem estar sob um bom estado operacional. Além disso, os hospitais são responsáveis por assegurar que o provisionamento dos seus itens seja feito de maneira segura, precisa e confiável. Logo, devido a tais responsabilidades, as instituições de saúde optam pela manutenção externa, ou seja, realizada pelo fabricante do equipamento ou por uma empresa terceirizada.

A manutenção externa pode ser entendida quando o cliente (proprietário do ativo e recebedor da manutenção) transfere a incumbência do reparo para outro agente (empresa contratada, prestador do serviço ou fabricante) sob um contrato de serviço, o qual especifica cláusulas e obrigações entre as partes envolvidas (MURTHY; JACK, 2014).

No âmbito acadêmico, diversos estudos, análises e pesquisas sobre a terceirização (ou contratos) da manutenção, garantia estendida e políticas de manutenção para equipamentos alugados já foram realizadas (MURTHY; YEUNG, 1995; MURTHY; ASGHARIZADEH, 1998; ASGHARIZADEH; MURTHY, 2000; KIM *et al.*, 2001; RINSAKA; SANDOH, 2006;

PONGPECH; MURTHY, 2006; TARAKCI *et al.*, 2006; JACKSON; PASCUAL, 2008; ESMAEILI; GAMCHI; ASGHARIZADEH, 2014; HUSNIAH; PASARIBU; ISKANDAR, 2015 e GUEDES *et al.*, 2015). Entretanto, tais trabalhos apresentam sérias limitações no que diz respeito a estrutura falha-reparo do equipamento, os quais só podem ser aplicados em contextos específicos.

Partindo dessas severas limitações e buscando um maior realismo referente à manutenção de equipamentos hospitalares, caracterizados por serem sistemas reparáveis complexos, a presente dissertação utiliza o reparo imperfeito modelado pelo Processo de Renovação Generalizado (PRG) na estrutura falha – reparo do item.

Yañez, Joglar & Modarres (2002) apontam 5 estados mutuamente exclusivos que o item pode apresentar após a realização da manutenção:

I. Tão bom quanto novo (*as good as new*) – essa situação implica no reparo perfeito, isto é, sob essa condição, o sistema é recuperado a um estado de como se fosse novo. Por exemplo, a revisão completa de um motor com uma biela quebrada. Geralmente, a substituição de um item avariado por um novo é associada ao reparo perfeito;

II. Tão ruim quanto velho (*as good as new*) – essa situação implica no reparo mínimo, isto é, sob essa condição, o sistema apresenta as mesmas características que tinha imediatamente antes da falha. Por exemplo, a troca de um pneu furado de um carro; para esse cenário a função intensidade de falha do automóvel não muda após a intervenção da manutenção (substituição do pneu), ou seja, ocorreu apenas a mudança do estado não operacional para um operacional;

III. Melhor que velho e pior que o novo (*better than old but worse new*) – essa situação implica no reparo imperfeito. Nesse ambiente, o estado do sistema fica numa condição intermediária entre o reparo perfeito e o reparo mínimo, logo a manutenção imperfeita claramente generaliza os casos extremos I e II;

IV. Melhor que novo (*better than new*) – essa situação implica na recuperação do sistema a um estado melhor do que era quando novo; pode estar relacionado à descoberta de um novo componente tecnológico que influencie a taxa de falha do item;

V. Pior que velho (*worse than old*) – essa situação implica que o sistema, após a ação da manutenção, volta numa condição pior do que antes da falha.

Desses 5 estados apresentados, apenas os dois primeiros, os reparos perfeito e mínimo, detêm um grande número de trabalhos já concebidos (DIMITRAKOS; KYRIAKIDIS, 2007).

Em tais modelagens, os seguintes processos estocásticos são empregados: Processo de Renovação (PR), incluindo o Processo Homogêneo de Poisson (PHP), aplicado para o reparo perfeito, e o Processo Não Homogêneo de Poisson (PNHP), usado para o reparo mínimo.

Entretanto, enfatiza-se que a situação mais usual é outra; as ações de manutenção normalmente recuperam o item a uma condição intermediária (melhor que velho e pior que novo) e implicando na ocorrência do reparo imperfeito (WANG; PHAM, 1996). Brown & Proschan (1983) e Nakagawa & Yasui (1987) citam algumas possíveis causas para esse acontecimento: o reparo da peça errada; retificar parcialmente uma peça defeituosa; avaliação incoerente da unidade inspecionada; realização da manutenção fora do período agendado; não considerar o impacto do reparo nos componentes adjacentes; falhas ocultas não detectadas durante a manutenção e a possibilidade do erro humano.

Dentre as diversas formas utilizados para mensurar o reparo imperfeito (WANG; PHAM, 1996), o PRG vem recebendo um grande destaque. Proposto por Kijima & Sumita (1986), esse se caracteriza pela flexibilidade, pois incorpora os 5 estados possíveis que um sistema pode apresentar após a realização da manutenção. Adicionalmente, o PRG insere a questão da eficácia (qualidade) nas ações manutenção.

Portanto, a partir dos pontos apresentados, a presente pesquisa modela a interação estratégica entre um hospital e o fabricante do equipamento hospitalar, via uma adaptação do jogo líder – seguidor de Stackelberg. Adicionalmente, o reparo imperfeito via o PRG aufere um maior realismo na presente análise. Finalmente, com base nos dados de falha e reparo de um Angiógrafo¹, realizar-se-á um exemplo número a fim de saber as decisões tomadas pelos entes envolvidos e o equilíbrio do modelo.

1.2 Justificativa e contribuição do estudo

A manutenção hospitalar é um ponto bastante pertinente dentro do gerenciamento das instituições de saúde. Um hospital de grande porte pode ter mais de 10.000 dispositivos médicos que apresentem diversas características e funcionalidades (TAGHIPOUR, 2011). Com esse extenso volume, torna-se inviável ter um departamento próprio de manutenção capaz de gerenciar a manutenção de todos os itens. Desta forma, os hospitais optam pela terceirização dessa atividade, em especial, quando se trata de equipamentos caros e de alta complexidade.

¹ O **Angiógrafo** é um equipamento hospitalar de alta complexidade que permite a geração de imagens no interior do corpo humano. Esse dispositivo médico realiza exames que permitem o diagnóstico dos vasos circulatorios não visíveis na radiologia convencional. Ademais, tal equipamento permite identificar doenças, tais como: infarto do miocárdio, acidente vascular cerebral, embolia pulmonar e outras.

Em 1996, os contratos de manutenção hospitalar, em nível global, geraram aproximadamente 10 bilhões de dólares (BLUMBERG, 2004). No ambiente nacional, os contratos de manutenção são normalmente empregados para equipamentos de média e alta complexidade, esses estão entre 4% a 10% do portfólio de dispositivos médicos instalados e entre 30% a 60% do valor monetário (CALIL; TEIXEIRA, 2002). Entretanto, mesmo envolvendo um elevado custo, há uma lacuna na literatura quantitativa da terceirização da manutenção e análise da garantia de dispositivos hospitalares.

Mesmo com um elevado impacto financeiro, Cruz & Rincon (2012) observaram 55 artigos acadêmicos sobre a manutenção industrial e concluíram que os modelos matemáticos e estocásticos empregados nos contratos de manutenção não podem ser aplicados num contexto hospitalar, devido as hipóteses são restritivas e específicas. Assim sendo, o estudo matemático da terceirização da manutenção hospitalar está em sua fase embrionária e esta dissertação visa expandir o presente tema no intuito de ampliar a discussão sobre essa problemática.

Quanto ao emprego da teoria matemática dos jogos, essa é utilizada devido a sua capacidade de analisar situações de natureza competitiva, indo desde “atividades recreativas” como futebol, xadrez e pôquer, como também, o relacionamento entre empresas, países e forças militares (MORRIS, 1994). Os objetivos da teoria dos jogos podem ser sintetizados em dois:

I. Descrever o motivo (a razão) pela qual as partes envolvidas (jogadores) apresentam determinados comportamentos em situações estratégicas;

II. Aconselhar os jogadores sobre a melhor maneira de jogar, isto é, a teoria dos jogos permite descrever ao jogador a estratégia que garante o melhor resultado possível.

Na análise da terceirização da manutenção, a teoria dos jogos funciona como um arcabouço de um conjunto de ideias e princípios que fornecem um guia efetivo para a elaboração da estratégia dos tomadores de decisão (MURTHY; JACK; KUMAR, 2013). Ressalta-se que essa ferramenta também considera a interdependência mútua das ações entre os participantes. Logo, a ação de um dos envolvidos interfere na decisão (ou possibilidade de escolha) do outro, acarretando um aumento da complexidade sobre o ambiente estratégico de tomada de decisão (MURTHY; KARIM; AHMADI, 2015).

Quanto a incorporação do jogo de Stackelberg na interação entre hospital e fabricante hospitalar é devido a sua estrutura sequencial, não cooperativa e com diferentes níveis de poder entre as empresas envolvidas (dominante e dominado). Tal jogo, tem sido adaptado no estudo da terceirização da manutenção e da garantia estendida por diversos autores (MURTHY;

YEUNG, 1995; MURTHY; ASGHARIZADEH, 1998; ASGHARIZADEH; MURTHY, 2000; ESMAEILI; GAMCHI; ASGHARIZADEH, 2014).

Já a hipótese do reparo imperfeito é empregada por causa das hipóteses simplificadoras e restritas que os reparos perfeito e mínimo possuem e não aplicáveis a equipamentos hospitalares. Pham & Wang (1996) afirmam que o reparo perfeito só pode ser empregado para sistemas com um componente e que são estruturalmente simples. Kijima (1989) afirma que o reparo mínimo é plausível quando a ocorrência da falha é evidenciada em componentes secundários de um item, desta forma ocorre apenas a substituição por um novo (não afeta a taxa de falha). Por fim, a utilização do PRG na modelagem do reparo de um sistema é empregada devido a sua versatilidade de representar qualquer estado do sistema após a intervenção da manutenção e possuir uma boa consistência metodológica para a manutenção corretiva.

Portanto, para um equipamento hospitalar, caracterizado por ser um sistema reparável complexo, formado de vários multicomponentes, as hipóteses de intensidade de falha constante, reparos mínimo e perfeito não são factíveis. Sendo assim, o reparo imperfeito corresponde a uma opção mais realista e comumente encontrada na prática.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é utilizar o ferramental de teoria dos jogos, em especial, o jogo de Stackelberg para construir um modelo de apoio à decisão no que diz respeito à venda e possibilidade de adesão da garantia estendida de um equipamento hospitalar. O PRG é usado como o processo estocástico de falha– reparo do item, tal atribuição faz o modelo ser aplicável no ambiente clínico-médico.

Adicionalmente, por meio de um exemplo numérico serão calculadas as estratégias ótimas do hospital e do fabricante. Duas extensões dos trabalhos são apresentadas a fim de saber o que acontece com o equilíbrio do modelo: uma mudança no processo estocástico de falha– reparo do equipamento e uma variação no grau de aversão ao risco do hospital.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- I. Contextualizar o problema de garantia estendida no ambiente hospitalar como uma adaptação do jogo de Stackelberg, enfatizando a designação do poder na interação estratégica entre hospital e fabricante e as decisões a serem tomadas pelas empresas;
- II. Utilizar os dados de tempo entre falhas e reparo do Angiógrafo e por meio desses utilizar as técnicas de simulação encontrar o valor esperado da intensidade de falha do

equipamento, número médio de falhas, tempo médio de reparo, prever as estratégias ótimas dos jogadores e o tempo esperado de inatividade do equipamento.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos:

- O Capítulo 1 contextualiza o trabalho, define os objetivos da dissertação (geral e específicos) enfatizando os seguintes pontos: relevância e aplicabilidade;
- O Capítulo 2 apresentará um enquadramento teórico sobre os principais elementos que vão ser utilizados na concepção do modelo. Desta forma, serão apresentadas as principais características da terceirização da manutenção, em especial, destacando os equipamentos hospitalares e o papel da garantia na relação entre cliente e fabricante. Adicionalmente, explicar-se-á os conceitos microeconômicos, os elementos que constituem a teoria dos jogos, enfatizando a dinâmica do jogo de Stackelberg, e os processos estocásticos relacionados aos tipos de reparo empregados, destacando o PRG;
- O Capítulo 3 apresentará os detalhes e as características do modelo proposto, uma adaptação do jogo de Stackelberg entre o hospital e o fabricante do equipamento hospitalar, no qual é negociada a possibilidade da venda da garantia estendida à instituição de saúde;
- No Capítulo 4, será realizada uma análise do modelo proposto, a fim de determinar as estratégias tomadas pelo hospital e fabricante, a partir de um exemplo numérico com os dados de um Angiógrafo. Complementarmente, ocorrerá uma análise de sensibilidade, isto é, os resultados encontrados do reparo imperfeito são comparados com as situações de reparos perfeito e mínimo. Ademais, mostrar-se-á como o parâmetro de aversão ao risco do hospital afeta as estratégias dos jogadores;
- O último capítulo mostrará as conclusões obtidas desta pesquisa. Posteriormente, serão apresentadas as limitações e sugestões para trabalhos futuros a partir do modelo desenvolvido.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Nesse capítulo, serão introduzidos os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do modelo proposto, enfatizando os seguintes pontos: as implicações estratégicas do jogo de Stackelberg, o papel da garantia estendida de equipamentos hospitalares e a versatilidade do PRG na modelagem do estado do sistema após as ações de manutenção. Na última parte dessa seção, detalhar-se-á um modelo quantitativo de contratos de manutenção.

2.1 Teoria dos jogos

2.1.1 Elementos da teoria dos jogos

Segundo Greve (2015), um jogo é fomentado com 4 componentes: os tomadores de decisão (jogadores), as opções as quais podem ser tomadas, os objetivos relacionados com as opções escolhidas e o conhecimento dos jogadores sobre a estrutura de interação. Abaixo são detalhados esses elementos de maneira mais específica:

- Os tomadores de decisão, na teoria dos jogos, são definidos como jogadores, os quais podem ser pessoas, empresas ou até mesmo animais. Além desses, é possível acrescentar um novo jogador, a natureza. Essa corresponde aos efeitos não controláveis de um jogo, ou seja, ela está relacionada com a incerteza e pode ser regida por meio de distribuições de probabilidade;
- As opções são decisões que cada jogador pode escolher, essas podem estar ou não listadas antes do início do jogo. Em outros jogos, os jogadores devem determinar as suas ações em diversos pontos no tempo (jogo contínuo) considerando as circunstâncias envolvidas. Ademais, as opções escolhidas pelos tomadores de decisão correspondem às suas estratégias, as quais implicarão em *payoffs* derivado das interações entre os envolvidos;
- O objetivo do jogador é escolher dentre todas as suas opções disponíveis a alternativa que forneça o maior retorno possível². Normalmente, essa recompensa é mensurada na escala ordinal e indica a percepção do jogador sobre o resultado esperado, considerando todas as possibilidades de desfecho do jogo. Ressalta-se que o retorno de um jogador não depende apenas da própria ação do jogador, mas

² Na situação em que o **jogador escolhe o maior retorno possível** é porque está sendo considerada a hipótese da racionalidade.

devem ser consideradas todas as escolhas feitas pelos demais envolvidos no jogo (problema de otimização social ou um problema de otimização conflitante);

- A estrutura informacional representa o quanto o jogador conhece sobre o jogo que está inserido, tal fato influencia fortemente a decisão a ser realizada. Quando os jogadores conhecem todas as decisões passadas realizadas pelos participantes em qualquer fase, o jogo é classificado como de informação perfeita. Caso contrário o jogo é classificado como de informação imperfeita. Se os jogadores conhecem o conjunto de participantes envolvidos, o conjunto de estratégias que cada jogador pode efetuar e todos os *payoffs* associados, o jogo é classificado como de informação completa. Caso contrário, o jogo é classificado de incompleta.

2.1.2 Representação do jogo

Tradicionalmente, as formas mais usuais de representação e caracterização dos jogos são as formas normal e extensiva. A forma normal ou estratégica é a maneira mais comumente empregada para analisar os jogos simultâneos (GIBBONS, 1992). Em tais jogos, cada jogador escolhe uma estratégia, sem o conhecimento do outro jogador, e a combinação de estratégias escolhidas dará o *payoff* de cada ente participante.

Gibbons (1992) especifica 3 elementos de um jogo sob sua forma normal:

- Os jogadores envolvidos;
- As estratégias disponíveis para cada jogador;
- O *payoff* recebido para cada jogador dada a combinação estratégica que poderia ser escolhida pelo jogador.

Utilizando esses elementos, o jogo na forma normal pode ser visualizado por meio de uma matriz. A tabela 2.1 mostra um exemplo numérico de um jogo simultâneo com dois jogadores (Jogador 1 e Jogador 2) em que cada participante tem duas possíveis estratégias. O Jogador 1 tem as estratégias “cima” e “baixo” e as estratégias do Jogador 2 são “esquerda” e “direita”. Em cada célula, o primeiro número representa o *payoff* do Jogador 1 e o segundo número representa o *payoff* do Jogador 2. Por exemplo, se o Jogador 1 optar pela estratégia “cima” e o Jogador 2 optar pela a estratégia “esquerda”, então os *payoffs* resultantes serão: ganho 0 para o jogador 1 e o ganho 2 para o jogador 2.

Tabela 2.1- Representação Matricial de um Jogo Normal

		Jogador 2			
		esquada		direita	
Jogador 1	cima	0	2	1	1
	baixo	4	1	3	2

Fonte: Esta pesquisa (2015)

Já a forma extensiva é empregada quando ocorrer eventuais desdobramentos do jogo, ou seja, prolongamentos associados a sucessivas etapas, transmitindo a ideia de sequencialidade. Para esse tipo de representação, o tempo em que as decisões foram tomadas e o nível de informações que os jogadores possuem são explicitados (KREPS; WILSON, 1982).

Gibbons (1992) especifica 5 pontos que um jogo sob forma extensiva tem:

- Os jogadores;
- O momento em que cada jogador vai executar seu movimento;
- O que cada jogador pode fazer cada vez que tem a oportunidade de jogar;
- O que cada jogador sabe cada vez que tem a oportunidade de jogar;
- Os *payoffs* para cada jogador relacionados às possíveis combinações de estratégias.

Deste modo, a representação de um jogo sob a forma extensiva mostra o nível de informação disponível, a ordem (sequenciamento) das ações entre os jogadores, as suas consequências (interação) e os seus respectivos *payoffs*.

A maneira usual de representar um jogo na forma extensiva é por meio de uma árvore, denominada como a árvore do jogo. Nela, os pontos são chamados de nós, esse são os possíveis estados (etapas) que o jogo pode estar. O primeiro nó (nó inicial) corresponde ao início do jogo, não apresenta predecessor e indica a decisão a ser executada pelo jogador. Os últimos nós (nós terminais) indicam o final do jogo; esses não possuem sucessores e apresentam os *payoffs* dos jogadores derivados de suas interações.

A Figura 2.1 mostra um exemplo para um jogo representado em sua forma extensiva com as seguintes características: duas etapas, dois jogadores, cada participante duas estratégias mutuamente exclusivas e precisa executar uma ação. O primeiro nó corresponde à ação do Jogador 1, o segundo nó corresponde à ação do Jogador 2 e os últimos nós são *payoffs* dos jogadores.

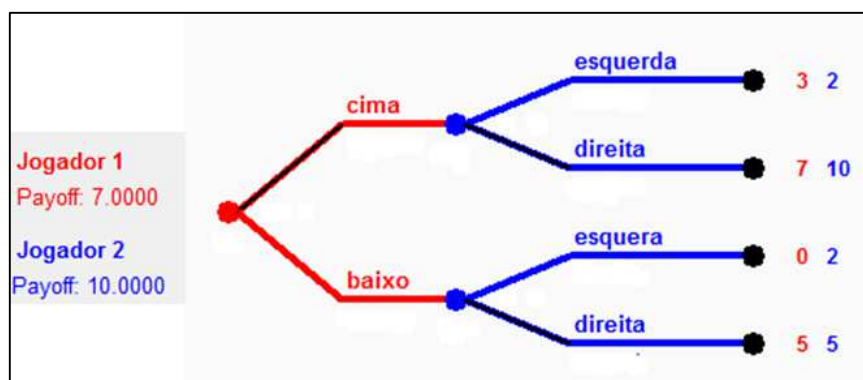


Figura 2.1-Árvore do Jogo Sequencial na Forma Estendida
Fonte: Esta pesquisa (2016)

Finalmente, é fundamental ressaltar que qualquer jogo pode ser especificado tanto na forma normal como na extensiva. Logo, um jogo sequencial pode ser visto na forma normal e um jogo simultâneo pode ser visualizado na forma extensiva, embora, para alguns tipos de jogos uma das formas pode ser mais apropriada que outra (GIBBSON, 1992).

2.1.3 Jogos não cooperativos

Dentre os diversos tipos e classificações dos jogos, a teoria de jogos não cooperativos analisa as ações dos jogadores, as quais são feitas de maneira individual, isto é, não considera a possibilidade de negociação com os outros participantes. Nash (1950) afirma que esse tipo de jogo é baseado na ausência de coalizões, também é assumido que cada indivíduo age de maneira independente, sem a colaboração ou comunicação com qualquer outro jogador envolvido (não existe decisão em grupo).

Para Greve (2015), o objetivo dos jogos não cooperativos é descobrir o que acontece numa sociedade quando os indivíduos tomam decisões de maneira individual, independente e estratégica, sob um ambiente que se baseia na ausência de coalizão, sem poder contar com a colaboração ou comunicação com qualquer dos outros agentes. O fato dessas decisões serem individuais não descarta a possibilidade de uma pessoa poder limitar as opções das demais (WATSON, 2013).

Quanto aos exemplos de jogos não cooperativos, Greve (2015) cita “Dilema do Prisioneiro”, “Batalha dos Sexos”, “Jogo da Galinha”, “Jogo da Caça ao Cervo” e “Tragédia dos Comuns”. Além desses, os modelos de competição entre empresas, como o jogo de duopólio de Stackelberg, também são classificados como jogos não cooperativos. O conceito de Equilíbrio de Nash é utilizado na provisão de solução dos jogos não cooperativos.

2.1.3.1 Equilíbrio de Nash

O equilíbrio de Nash representa um dos conceitos mais difundidos dentro da teoria dos jogos não cooperativos, proposto por John Nash em 1950. De forma geral, o equilíbrio de Nash corresponde à situação em que o jogador ao optar por uma determinada estratégia não tem interesse em mudá-la, caso as estratégias dos demais jogadores permaneçam constantes. Para Osborne & Rubinstein (1994), o equilíbrio de Nash representa um conceito de solução em jogos não cooperativos envolvendo dois ou mais jogadores, no qual para cada jogador é assumido conhecer as estratégias de equilíbrio dos demais jogadores e nenhum jogador ganha algo (incremento no *payoff*) ao tentar alterar individualmente sua decisão.

Sendo assim, a definição do equilíbrio de Nash exige que todas as estratégias adotadas por todos os jogadores sejam as melhores respostas às estratégias dos demais. A estratégia prevista de cada jogador deve ser a sua melhor resposta para as demais estratégias previstas dos outros jogadores (GIBBONS, 1992).

Matematicamente, o equilíbrio de Nash pode ser visto da seguinte forma:

$$z_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq z_i(s_i, s_{-i}^*) \text{ para todo } s_i \text{ e todo } i, \quad (2.1)$$

em que, z_i representa o *payoff* de um jogador i , s_i é uma estratégia do jogador i , s_{-i} é o conjunto de estratégias dos demais jogadores exceto i e o sinal de asterisco indica que a estratégia faz parte do equilíbrio de Nash, isto é, a melhor ação realizada dadas as ações otimizadas dos demais jogadores (FIANI, 2009).

Caso cada jogador esteja jogando uma estratégia que lhe confira um *payoff* estritamente superior aos demais, o equilíbrio de Nash será denominado como estrito, visualizado Equação 2.2.

$$z_i(s_i^*, s_{-i}^*) > z_i(s_i, s_{-i}^*) \text{ para todo } s_i \text{ e todo } i. \quad (2.2)$$

2.1.3.2 Jogo de Stackelberg

O modelo de Stackelberg relaciona a situação em que duas empresas determinam a quantidade a ser produzida num mercado. O jogo recebeu esse nome em função do economista alemão Heinrich von Stackelberg, pois no ano de 1934 ele publicou o livro *Marktform und Gleichgewicht* o qual aborda a estrutura de competição em oligopólios. Ele é também considerado o primeiro a estudar de maneira sistemática as interações líder e seguidor (VARIAN, 2010).

De forma geral, o modelo original de Stackelberg apresenta informação completa e perfeita, possuindo as seguintes características (GIBBONS, 1992):

- a) Os movimentos ocorrem de maneira sequencial;
- b) Todos os movimentos anteriores foram observados por todos os jogadores antes do próximo movimento a ser escolhido;
- c) Os *payoffs* dos jogadores para cada combinação possível de movimento são comumente conhecidos.

As hipóteses que circundam o jogo são (GREVE, 2015; VARIAN, 2010; FIANI, 2009; GIBBONS, 1992):

1. Existem duas empresas no mercado e elas produzem um produto homogêneo;
2. As empresas são racionais e vão buscar estratégias que maximizem seus respectivos lucros;
3. Todo o custo de produção é conhecido pelas empresas;
4. A produção gerada pelas empresas é absorvida pelo mercado, desse modo não existe estoque;
5. As firmas interagem uma vez e não podem fazer acordos após suas ações, isto é, não existe barganha;
6. O jogo é estruturado para duas etapas (jogo dinâmico) e as empresas possuem níveis distintos de poder. Uma organização é denominada a líder/dominante e essa auferir uma maior participação de mercado que a outra empresa, denominada seguidora/dominada;
7. Antes de decidir qual será seu nível de produção, a líder sabe que a seguidora está observando o seu comportamento (informação perfeita) e reagirá conforme sua decisão;
8. A quantidade produzida interfere negativamente no preço de mercado. Logo, quanto maior for a produção total das duas firmas menor será o preço de equilíbrio do mercado (função inversa da demanda).

Ao observar as suposições relacionadas ao jogo de Stackelberg, esse pode ser resumido como uma teoria de interação estratégica (WEBSTER, 2003), na qual a líder deve escolher o nível de produção que maximize seu lucro, dada a existência de uma outra empresa (seguidora) que reage a sua escolha.

O *timing* do jogo é dado da seguinte forma: atribuindo à empresa 1 (F_1) o papel de líder e a empresa 2 (F_2) o papel de seguidora, cada organização determina individualmente as quantidades a serem produzidas quantidades o_1 (quantidade produzida por F_1) e o_2 (quantidade

produzida por F_2). Finalmente, o custo total³ é a quantidade de *output* multiplicado pelo custo da produção (c).

As etapas temporais que o jogo proporciona são as seguintes:

1. No primeiro período de tempo, F_1 determina uma quantidade $o_1[0, \infty)$ que maximiza o seu lucro;
2. No segundo período de tempo, F_2 observou a ação efetuada por F_1 e determina a quantidade que se deve produzir $o_2[0, \infty)$. Note que a atitude de F_2 é condicionada ao movimento prévio de F_1 ; tal situação é evidenciada por sua função reação (VARIAN, 2010).

O preço de mercado, $p(o)$, por exemplo, pode ser descrito numa função de demanda linear, equação 2.3:

$$p(o) = A - k(o), \text{ dado que } o = o_1 + o_2 \quad (2.3)$$

em que A e k são constantes estritamente positivas relacionadas ao comportamento da demanda com o preço de mercado. Enfatiza-se que a Equação 2.3 informa que à medida com que o nível de produção cresce, menor será o retorno monetário decorrente da venda das unidades produzidas (hipótese 8).

Os lucros P_1 e P_2 de F_1 e F_2 , respectivamente, correspondem às Equações 2.4 e 2.5:

$$P_1 = p(o)o_1 - co_1 \quad (2.4)$$

$$P_2 = p(o)o_2 - co_2 \quad (2.5)$$

Os custos das equações de lucro F_1 e F_2 foram simplificados, uma vez que só foi considerado apenas o custo marginal constante da produção c para ambas as empresas, o custo fixo foi desprezado para facilitar a interpretação.

Para encontrar a solução desse jogo é utilizado o artifício *backward induction* (indução retroativa), isto é, primeiro resolve-se o problema de decisão da seguidora, o jogador responsável pelo segundo movimento, determinando a quantidade que ela deve produzir. Posteriormente, esse resultado é incorporado na função de lucro da líder e se encontra a quantidade ótima que a dominante produzirá (GREVE, 2015).

O resultado por *backward induction* para os jogos de informação perfeita não envolve ameaça de credibilidade entre os jogadores, isto é, no jogo de Stackelberg, o líder antecipa qual será o comportamento ótimo que o seguidor efetuará conforme sua ação escolhida. Logo, ao

³ O **custo total** das empresas para esse exemplo é apresentado de maneira simplificada, ou seja, são iguais.

limitar a ação do seguidor pode-se chegar à solução que maximiza o lucro da líder (GIBBONS, 1992).

Matematicamente, para encontrar o lucro máximo de F_2 é preciso derivar a Equação 2.5 em relação à quantidade o_2 e igualar a zero, ou seja, o seu ponto crítico:

$$\frac{dP_2}{do_2} = A - ko_1 - 2ko_2 - c = 0 \quad (2.6)$$

Por meio de uma manipulação algébrica da equação 2.6, a quantidade que maximiza o lucro de F_2 corresponde:

$$o_2 = \frac{A - ko_1 - c}{2k} \quad (2.7)$$

Como a segunda derivada da Equação 2.6, em relação a o_2 , é negativa ($-2k$), a condição de máximo local é satisfeita. Sendo assim, a Equação 2.7 representa a função de reação (ou melhor reposta) de F_2 para qualquer nível de produção de F_1 . Observa-se que conforme o_1 cresce menor é a quantidade que F_2 colocará no mercado.

Para resolver o problema de maximização do lucro da líder, novamente deve-se resolver outra otimização, substitui o valor de o_2 , Equação 2.7, na função objetivo de F_1 , Equação 2.4, e se deriva em relação a o_1 . Posteriormente, isola-se o valor de o_1 e encontra-se a quantidade ótima que a empresa 1 deve produzir:

$$o_1 = \frac{A - c}{2k} \quad (2.8)$$

Com o valor ótimo encontrado para o_1 , determina-se o_2 , ou seja, substitui a Equação 2.8 na Equação 2.7:

$$o_2 = \frac{A - c}{4k} \quad (2.9)$$

Ademais, a quantidade agregada produzida no mercado (o) é:

$$o = \frac{3(A - c)}{4k} \quad (2.10)$$

Logo, o equilíbrio de Nash para o Jogo de Stackelberg correspondem às Equações 2.8 e 2.9. Desse modo, nenhuma das empresas tem incentivo a alterar o seu nível de produção se a outra mantiver constante o seu volume produzido.

A conclusão do jogo de Stackelberg é que a empresa líder ao determinar inicialmente seu nível de produção auferir uma vantagem competitiva (poder de mercado), implicando um lucro maior que sua concorrente. Uma vez que a seguidora toma a produção da líder como fato consumado, esta deve optar por um nível de produção mais baixo, já que, caso produza uma quantidade mais elevada, ocasionar-á uma queda no preço de mercado e ambas as empresas terão *payoffs* menores. Logo, esse jogo apresenta a “vantagem de se mover primeiro” (PINDYCK; RUBINFELD, 2009).

2.2 Conceitos microeconômicos

2.2.1 Utilidade

A utilidade pode ser enunciada como o valor percebido decorrente da utilização de algum bem ou serviço, englobando aspectos econômicos, matemáticos e psicológicos. Por exemplo, se uma pessoa prefere sorvete de chocolate a de baunilha, então o indivíduo deve atribuir uma maior utilidade ao sorvete de chocolate, admitindo uma mesma quantidade de sorvete para ambos os sabores.

Baseado nesse simples exemplo, Varian (2010) enuncia o conceito de utilidade como uma maneira de descrever as preferências do consumidor. Relacionado a essa definição, a função utilidade é um modo do consumidor atribuir um valor numérico a cada possível cesta de consumo; as cestas mais preferidas apresentam valores maiores que as cestas menos preferidas. Por exemplo, a cesta (H_1, H_2) é preferível à cesta (N_1, N_2) se e, somente se, a utilidade de (H_1, H_2) for maior que a utilidade de (N_1, N_2) . Em símbolos, $(H_1, H_2) \succ (N_1, N_2)$ se e, somente se, $u(H_1, H_2) > u(N_1, N_2)$.

Dentre os tipos de função utilidade existentes, esse trabalho utilizará apenas função utilidade ordinal. Essa é caracterizada por colocar as preferências numa sequência da maior até a menor, não indicando o quanto uma cesta é mais preferível à outra. Por exemplo, se a $U_A = 4$ e $U_B = 8$, só podemos dizer que U_B aufere uma maior utilidade que U_A , entretanto, não podemos dizer que U_B é o dobro de U_A .

Outro ponto a se destacar da função utilidade é que ela pode ser passível a transformações monotônicas. Uma transformação monotônica representa um meio de transformar um conjunto de número em outros, mas preservando a ordem original dos números (VARIAN, 2010). Suponha que $f(u_1) = 5$ e $f(u_2) = 16$, implicando que $f(u_1) < f(u_2)$ e $u_1 < u_2$, então multiplicando $f(u_1)$ e $f(u_2)$ por 3, o resultado é $f(u_1) = 15$ e $f(u_2) = 48$, respectivamente, preservando a ordenação das funções originais.

Finalmente, é possível associar a função utilidade com a incerteza (imprevisibilidade) na tomada de decisão, implicando na utilidade esperada. Deste modo, o consumidor está preocupado com a distribuição de probabilidade de se obter diferentes cestas de bens, ou seja, cada cesta de consumo está associada a uma respectiva probabilidade e a utilidade esperada corresponde a um valor esperado na possível ocorrência do evento (VARIAN, 2010). Uma forma conveniente de visualizá-la é por meio da equação 2.11:

$$u(c_1, c_2, T_1, T_2) = c_1 T_1 + c_2 T_2 \quad (2.11)$$

em que à utilidade esperada corresponde a soma ponderada de alguma função consumo nos estados T_1 e T_2 , já os pesos são dados pelas suas respectivas probabilidades c_1 e c_2 (VARIAN, 2010).

Adicionalmente, a função de utilidade esperada acarreta em três cenários mutuamente exclusivos (eventos disjuntos) relacionados a prospecção do risco: neutralidade, aversão ou propensão ao risco. A diferença entre tais casos pode ser vista no exemplo:

Se uma pessoa se defronta com dois eventos mutuamente exclusivos que auferem o mesmo valor esperado, um certo G_2 (100% de ganhar R\$ 50) e o outro incerto G_1 (de 50% probabilidade de ganhar 100 e 50% de probabilidade de ganhar 0). Então, se G_2 for escolhido, o indivíduo é considerado avesso ao risco; caso a escolha seja G_1 , então ele é propenso ao risco e se for indiferente aos dois eventos é dito ser neutro ao risco. Outra maneira de interpretar o comportamento do agente em relação ao risco é por meio da desigualdade de Jensen (SOUZA, 2009). Graficamente os três casos para o nível de risco é visto na Figura 2.2, em que $u(x)$ corresponde a utilidade do indivíduo e x é o consumo/utilização de um determinado bem ou serviço.

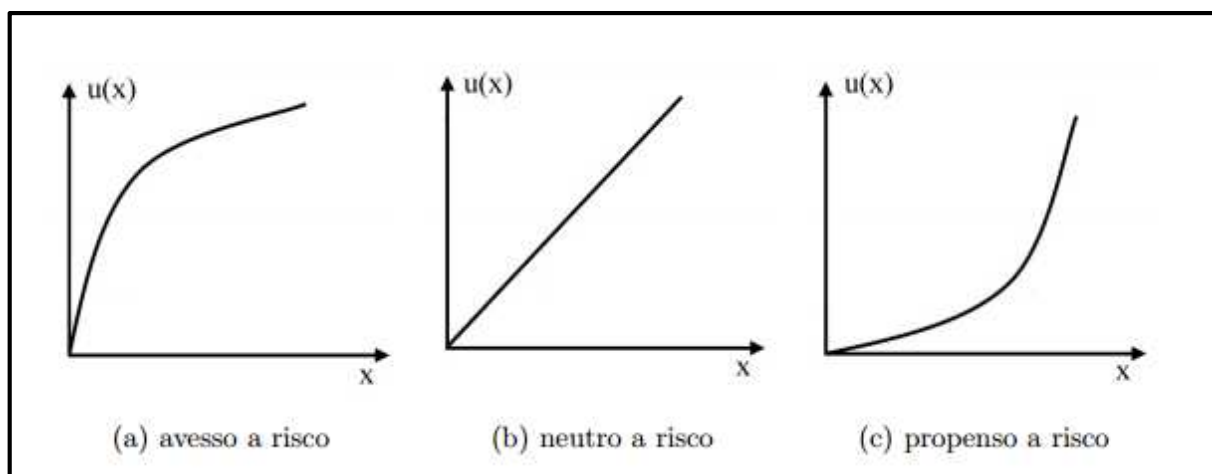


Figura 2.2– Relação entre a Função Utilidade e os Diferentes Perfis de Risco

Fonte: Souza (2009, p.6)

2.2.2 Excedentes do consumidor e produtor

O excedente do consumidor é uma medida de bem-estar econômico que capta a diferença entre a quantia máxima que o comprador está disposto a pagar (preço de reserva) e o valor que efetivamente ele paga. A Figura 2.3 apresenta graficamente o excedente do consumidor; nela P_1 representa o preço de mercado, A corresponde ao preço de reserva (disposição máxima de pagamento) que o cliente está propenso a pagar pelo produto e Q_1 é a quantidade adquirida pelo bem. A área sombreada do triângulo ABC representa o excedente do consumidor.

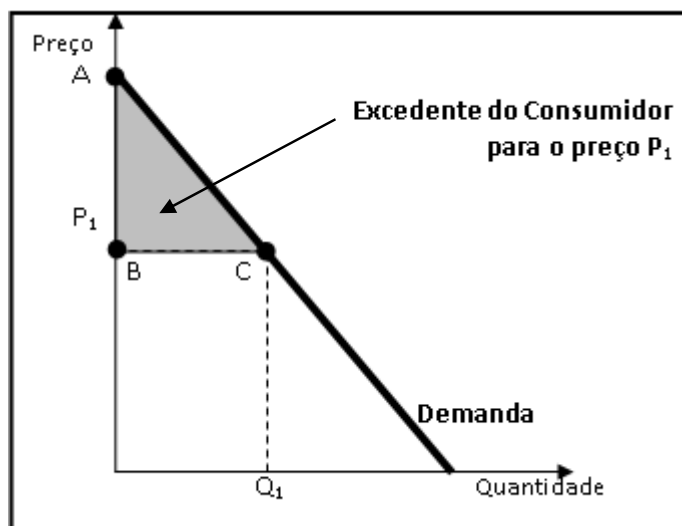


Figura 2.3– Excedente do Consumidor
Fonte: Esta pesquisa (2016)

De forma análoga, o excedente do produtor é outra medida de bem-estar econômico que representa a diferença entre o total das receitas auferidas decorrentes da produção e da venda de uma determinada quantidade de um produto e o que a empresa está disposta a aceitar para produzir e vender tal quantidade (WEBSTER, 2003).

Logo, o excedente do produtor mede o benefício que o produtor obtém ao vender um determinado bem para o consumidor. A Figura 2.4 analisa graficamente o excedente do produtor, nela P₁ representa o preço de mercado, L corresponde à disposição mínima de recebimento que o produtor está disposto a vender pelo produto e Q₁ é a quantidade vendida pelo bem. A área sombreada do triângulo LBC representa o excedente do produtor.

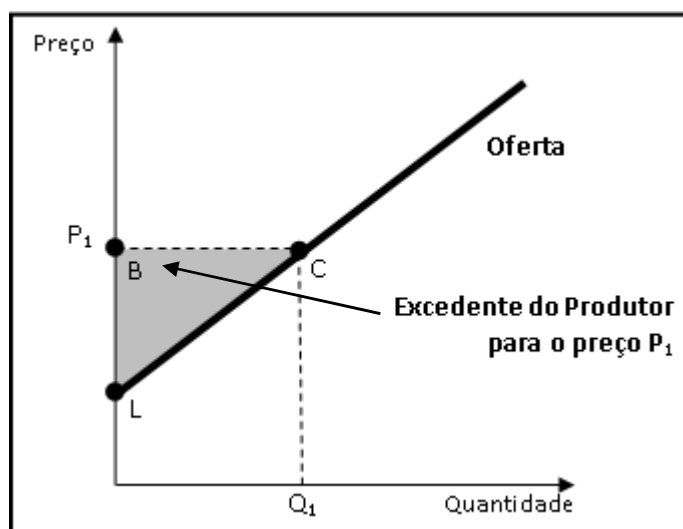


Figura 2.4– Excedente do Produtor
Fonte: Esta pesquisa (2016)

2.3 Processos estocásticos

Estudar distribuições de probabilidade é fundamental para identificar qual será o comportamento de uma variável aleatória (VA). Um exemplo de VA pode ser o tempo de reparo de um item ou o período até a próxima do equipamento. Sendo assim, com a posse de tais informações podem-se criar estratégias a fim de otimizar os recursos disponíveis e alcançar os objetivos propostos.

A partir da extensão do conceito de VA se chega à ideia de processo estocástico. Segundo Nelson (1995), um processo estocástico pode ser definido como o conjunto de resultados de uma VA indexados no tempo. A nomenclatura do processo estocástico é definida como $\{X(t): t \in T\}$. Desse modo, t representa o tempo, T o conjunto de pontos no tempo e $X(t)$ o valor do estado do processo estocástico no tempo t .

Já a classificação de um processo estocástico indexado no tempo pode ser de dois tipos: discreto ou contínuo (WANG; PHAM, 2006). Caso T corresponda a um conjunto de valores inteiros e evidenciados em pontos específicos no tempo, então o processo estocástico é dito ser tempo discreto, por exemplo, $T = \{0, 1, 2, \dots\}$ ou $T = \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$. Se T for igual a algum intervalo de uma linha real, então o processo estocástico é dito ser contínuo, por exemplo, $T = [a, b]$ ou $T = (-\infty, \infty)$.

Outro ponto a ser considerado dentro dos processos estocásticos é relacionado à capacidade para modelar a operacionalidade de componentes, equipamentos ou sistemas ao longo do tempo (WANG; PHAM, 2006). Yañez, Joglar & Modarres (2002) relacionam os tipos de processos estocásticos com as formas de reparo. Nessa dissertação, os processos estocásticos apresentados são: PR, PNHP e PRG.

2.3.1 Processo de renovação e processo (PR) não homogêneo de Poisson (PNHP)

O Processo de renovação assume que após a ação de reparo o sistema retorna a uma condição de novo, enquanto o processo não homogêneo de Poisson assume que o sistema retorna à mesma condição de antes da falha.

O PR corresponde a um processo estocástico em que os tempos de falha de um componente, equipamento ou sistema, são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.), ou seja, o sistema se renova após a ocorrência do evento e o tempo reparo é dado de maneira relativamente instantânea, é um processo estocástico pontual (YÁÑEZ; JOGLAR; MODARRES, 2002).

Azevedo (2013) argumenta que o sistema sujeito ao PR não possui memória, ou seja, o histórico de renovações ou o tempo decorrido antes da última renovação não influenciará no tempo da próxima. Caso as variáveis aleatórias sejam distribuídas exponencialmente, então o PR corresponderá a um Processo Homogêneo de Poisson (PHP), para mais detalhes (WANG; PHAM, 2006).

Portanto, o PR pode ser entendido como uma condição otimista quanto à qualidade do reparo. Nesse, o reparo destina-se a retornar o sistema a um estado de novo, em muitos casos, pode ser feita uma comparação com a situação de substituir um item avariado por um novo.

A partir do momento em que o tempo passa a interferir na função intensidade do processo estocástico, além de relaxar os pressupostos de incrementos estacionários, é empregado o PNHP (WANG; PHAM, 2006). O PNHP apresenta as seguintes hipóteses (FRAGA; PINTO, 2013):

- A variável aleatória tem incrementos independentes, isto é, o número de ocorrências de um evento durante o intervalo $(t, t + s)$ depende apenas do tempo t e do comprimento do intervalo s . Logo, quanto maior for o s , maior será o número esperado de falhas; além disso, a intensidade das falhas aumenta;
- Para um intervalo Δt muito pequeno, a probabilidade de que ocorra mais de um evento é negligenciável (processo estocástico pontual).

Finalmente, o PNHP pode ser entendido como uma condição pessimista quanto à qualidade do reparo. Neste, o reparo destina-se apenas a retornar o sistema ao seu estado operacional, sem se preocupar em prevenir futuras falhas, isto é, não existe melhoria de confiabilidade do sistema. Logo, o PNHP é destinado a modelar o reparo mínimo.

A Figura 2.5 mostra graficamente a relação entre intensidade de falha e idade do equipamento para os casos do PR e do PNHP.

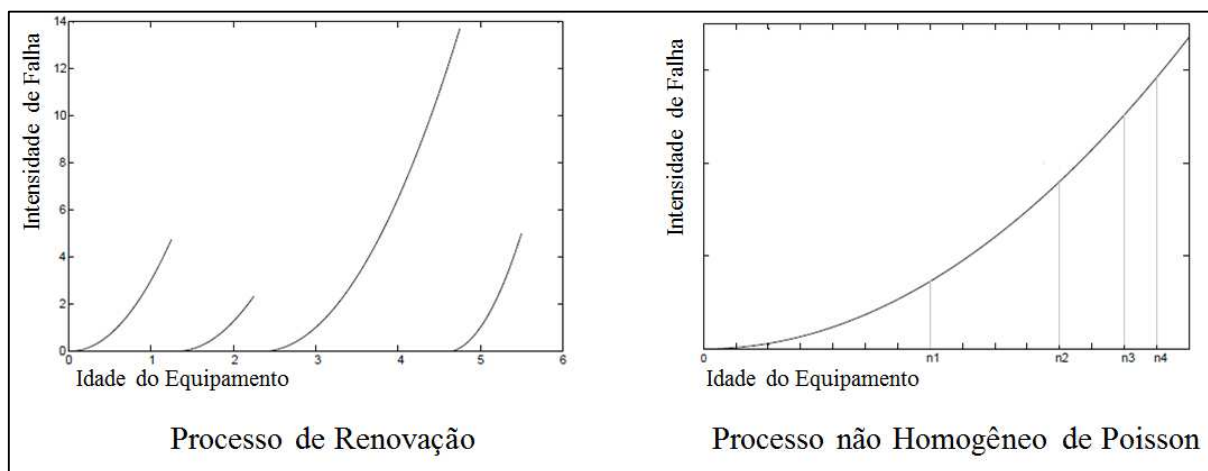


Figura 2.5- Relação entre Intensidade de Falha e Idade do Equipamento
Fonte: Adaptado de Jackson e Pascual (2015)

2.3.2 Processo de Renovação Generalizado

Em virtude das limitações envolvendo o PR e o PNHP, uma vez que esses modelam tipos de reparo pouco encontrados na prática, Kijima & Sumita (1986) criaram um modelo probabilístico baseado na ideia da “idade virtual”, conhecido como Processo de Renovação Generalizado (PRG). O PRG também é um processo estocástico pontual, assim como o PR e PNHP, e lida com os múltiplos tipos de estado de que um equipamento possa vir a apresentar após o reparo, ou seja, personifica os casos de reparos mínimo, perfeito, imperfeito, melhor e pior. Rocha (2006), Moura *et al.* (2007) e Azevedo (2013) apresentam uma completa discussão sobre as principais implicações e aplicabilidades do PRG.

Antes de expandir a estrutura matemática do PRG, é necessário saber a diferença entre as idades virtuais, antes e depois da ação de reparo, distingui-las da idade real (ou idade cronológica) do sistema e saber como o parâmetro de rejuvenescimento q interfere na determinação dessas idades.

Seja y_i a idade virtual do item antes da i -ésima ação de reparo; x_i a idade virtual do equipamento depois da ocorrência da i -ésima ação de reparo e t_i , a idade cronológica (tempo de processamento). Deste modo, a diferença entre y_i e x_i corresponde à redução da idade promovida pela ação de reparo, ou seja, se $y_i - x_i > 0$, então as ações de manutenção estão “retardando” a idade cronológica do item. A Figura 2.6 mostra a trajetória dessas duas idades virtuais com a idade real inter-relacionadas e o q .

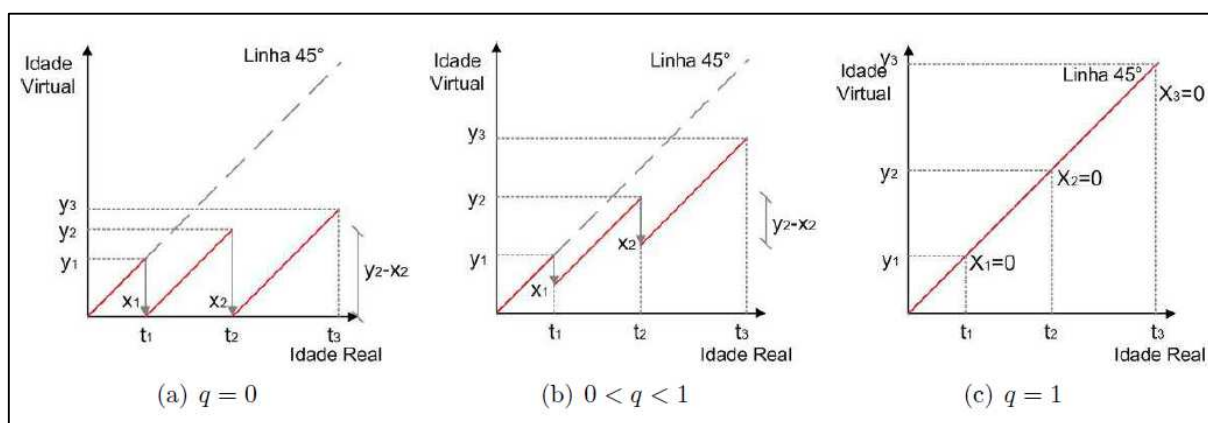


Figura 2.6– Relação entre a Idade Real e Virtual Inter-Relacionada com a Variação do Parâmetro de Rejuvenescimento

Fonte: Adaptado de Jacopino (2005)

O valor assumido pelo q permite a representação de todos os casos de reparo. Esse parâmetro é detalhado da seguinte forma:

- Quando $q = 0$, trata-se do reparo perfeito. Nessa situação, a idade virtual x_i é sempre restaurada para a origem do sistema (confiabilidade do item retorna ao ponto máximo) após a i -ésima ação de reparo;
- Quando $q = 1$, trata-se do reparo mínimo. Nessa situação, a idade virtual x_i é igual a idade real t_i após a ação do i -ésimo reparo;
- $0 < q < 1$, trata-se do reparo imperfeito. Nessa situação, a idade virtual x_i é sempre uma fração da idade cronológica.

Outros valores para o parâmetro q também são factíveis, logo é possível que esse ser superior a 1, correspondendo o “reparo pior” ou um valor menor que 0, representando o “reparo melhor”. Desta forma, em termos práticos, o q pode ser visto como um índice que representa a qualidade nas ações de reparo (YAÑEZ; JOGLAR; MODARRES, 2002).

Kijima & Sumita (1986) formularam dois tipos de modelos de idade virtual⁴. O primeiro é comumente chamado de Kijima tipo 1 e consiste na ideia de que o reparo atua apenas nas falhas que ocorrem no intervalo de exposição imediatamente anterior ao reparo. Deste modo, sendo $t_1, t_2, \dots$ são os tempos sucessivos de falha, a idade virtual do sistema sofre incrementos proporcionais com tempo. Tal modelo pode ser visualizado por meio da Equação 2.12, considerando o parâmetro de rejuvenescimento constante:

$$x_i = x_{i-1} + qh_i = qt_i, \quad (2.12)$$

em que h_i é o tempo entre a ocorrência da $(i - 1)$ -ésima falha e a i -ésima falha.

Já o segundo modelo, o Kijima tipo 2, consiste na ideia de que o reparo recupera o sistema de todos os danos decorrentes dos intervalos anteriores de exposição, considerando desde o início de operação do sistema. Neste modelo, a idade virtual sofre incrementos proporcionais durante todo o intervalo de exposição acumulado. A Equação 2.13 descreve essa situação, também considerando o parâmetro de rejuvenescimento constante:

$$x_i = q(x_{i-1} + h_i) = q(q^{i-1} h_1 + q^{i-2} h_2 + \dots + h_1) \quad (2.13)$$

Moura *et al.* (2007) argumentam que a escolha do modelo Kijima tipo 1 ou 2 é diretamente relacionada ao escopo do reparo, por exemplo: em sistemas complexos o Kijima tipo 2 é mais apropriado, enquanto que para componentes individuais é mais apropriado a utilização do Kijima tipo 1.

Finalmente, independente do modelo Kijima a ser utilizado é possível avaliar o i -ésimo tempo t_i por meio da distribuição acumulada de probabilidade condicionada à idade virtual do

⁴ Demais Modelos De Idade Virtual, recomenda-se ler Guo, Ascher & Love (2001).

equipamento x_{i-1} (idade virtual do item anterior a ação i de reparo). A Equação 2.14 mostra tal efeito:

$$F(h_i|x_{i-1}) = \frac{F(h_i+x_{i-1})-F(x_{i-1})}{1-F(x_{i-1})} \quad (2.14)$$

Assumindo, por exemplo, a distribuição de probabilidade Weibull para os tempos entre falhas, a Equação 2.14 pode ser reescrita na Equação 2.15. Essa distribuição de probabilidade é formada por dois parâmetros⁵: α (parâmetro de escala) e β (parâmetro de forma).

$$F(h_i|x_{i-1,\alpha,\beta}) = 1 - \exp \left[\left(\frac{x_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{h_i+x_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta \right], i = 1, \dots, n \quad (2.15)$$

2.3.2.1 Estimação dos parâmetros do PRG

Dentre os diversos métodos de estimação dos parâmetros do PRG, Yañez, Joglar & Modarres (2002) desenvolveram uma abordagem baseada em Estimadores de Máxima Verossimilhança⁶ (EMV's) utilizando a distribuição Weibull no tempo entre falhas.

A utilização desse método é empregada quando se é disponível uma grande quantidade de dados completos de falha. Além disso, tais autores direcionam a estimação dos parâmetros do PRG de duas maneiras: tempo terminado e falha terminada. Esta dissertação utiliza a abordagem de falha terminada, uma vez que são disponíveis todos os dados de falha até o último momento em que essa ocorreu. Ademais, a estimação é baseada no modelo Kijima tipo 1.

A descrição do método é a seguinte: até a ocorrência da primeira falha utiliza-se a função de densidade de probabilidade (FDP)⁷ da distribuição Weibull (Equação 2.16), o parâmetro de rejuvenescimento só passa a interferir na confiabilidade do equipamento só depois da ocorrência da manutenção.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\beta \right], x > 0 \quad (2.16)$$

Logo, a partir da primeira falha o sistema passa a ser influenciado pelo q , evidenciando o uso do PRG. A nova PDF da distribuição Weibull corresponde a equação 2.17:

$$f(x) = \left(\frac{\beta}{\alpha^\beta} \right) [t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j]^{\beta-1} \exp \left[\left(\frac{q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta - \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right], i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.17)$$

Com a Equação 2.17 aplica-se o método da Máxima Verossimilhança no intuito de encontrar os valores dos parâmetros de interesse: α , β e q . Abaixo é descrita a sequência de 5 etapas para encontrar os EMV's:

⁵ As características desses **Parâmetros** serão explicadas adiante.

⁶ Para saber os detalhes dos **Estimadores de Máxima Verossimilhança**, recomenda-se ler Montgomery, Runger & Hubele (2011).

- i. Encontrar o $f(x_i)$ ⁸;
- ii. Determinar a função de verossimilhança L em $f(x_i)$;
- iii. Aplicar o $\ln(L)$;
- iv. Derivar o $\ln(L)$ com relação aos parâmetros que serão estimados e igualá-los a zero;
- v. Verificar que estes estimadores são pontos de máximo e realizar o teste da segunda derivada de $\ln(L)$.

Após a conclusão da etapa iv, são encontradas três equações e três incógnitas (Equações 2.18, 2.19 e 2.20) decorrente das derivadas parciais de $\ln(L)$ em relação aos parâmetros de interesse (α , β e q):

$$\frac{d\ln(L)}{d\alpha} = -n\beta * \frac{1}{\alpha} - \frac{\beta}{\alpha^{\beta+1}} * \sum_{i=1}^n [(qt_{i-1})^\beta - (x_i + qt_i)^\beta] = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{d\ln(L)}{d\beta} = n * \frac{1}{\beta} - n * \ln \alpha + \sum_{i=1}^n \ln(x_i + qt_{i-1}) + \sum_i^n \left[\left(\frac{qt_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta * \ln \frac{qt_{i-1}}{\alpha} - \right. \quad (2.19)$$

$$\left. \left(\frac{x_i + qt_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta * \ln \frac{x_i + qt_{i-1}}{\alpha} \right] = 0$$

$$\frac{d\ln(L)}{dq} = (\beta - 1) * \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_{i-1}}{x_i + qt_{i-1}} \right) + \frac{\beta}{\alpha^\beta} * \sum_{i=1}^n [q^{\beta-1} * (t_{i-1})^\beta - t_{i-1} * (x_i + qt_{i-1})^{\beta-1}] = 0 \quad (2.20)$$

Das três equações encontradas, apenas na Equação 2.18 pode-se isolar o α , descobrindo assim o seu estimador (Equação 2.21). Com isso, substitui nas equações 2.19 e 2.20.

$$\hat{\alpha} = \left\{ -\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n [(qt_{i-1})^\beta - (x_i - qt_{i-1})^\beta] \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.21)$$

O sistema de equações gerados das manipulações matemáticas das Equações 2.19, 2.20 e 2.21, é impossível de se resolver analiticamente. Sendo assim, Yañez, Joglar & Modarres (2002) propõe a utilização da técnica de Simulação de Monte Carlo como forma de prover uma solução aproximada.

Inicialmente são gerados números aleatórios uniformemente distribuídos para β e q , num processo de tentativa e erro. Para β , os valores devem estar dentro do intervalo compreendido entre 0 e 5, pois valores superiores a 5 não são usuais. Quanto ao q , foram gerados valores entre 0 e 1, para representar o reparo imperfeito.

Com as estimativas para β e q , encontra-se o a estimativa de α . De posse dos três valores, substituem-se nas Equações 2.18, 2.19 e 2.20 a fim de saber se as derivadas parciais são iguais a 0 (etapa iv do EMV's). Caso não, o processo é reiniciado. O fluxograma que explica como o algoritmo é desenvolvido é apresentado na Figura 2.7.

⁸ A $f(x_i)$ corresponde a Equação 2.17.

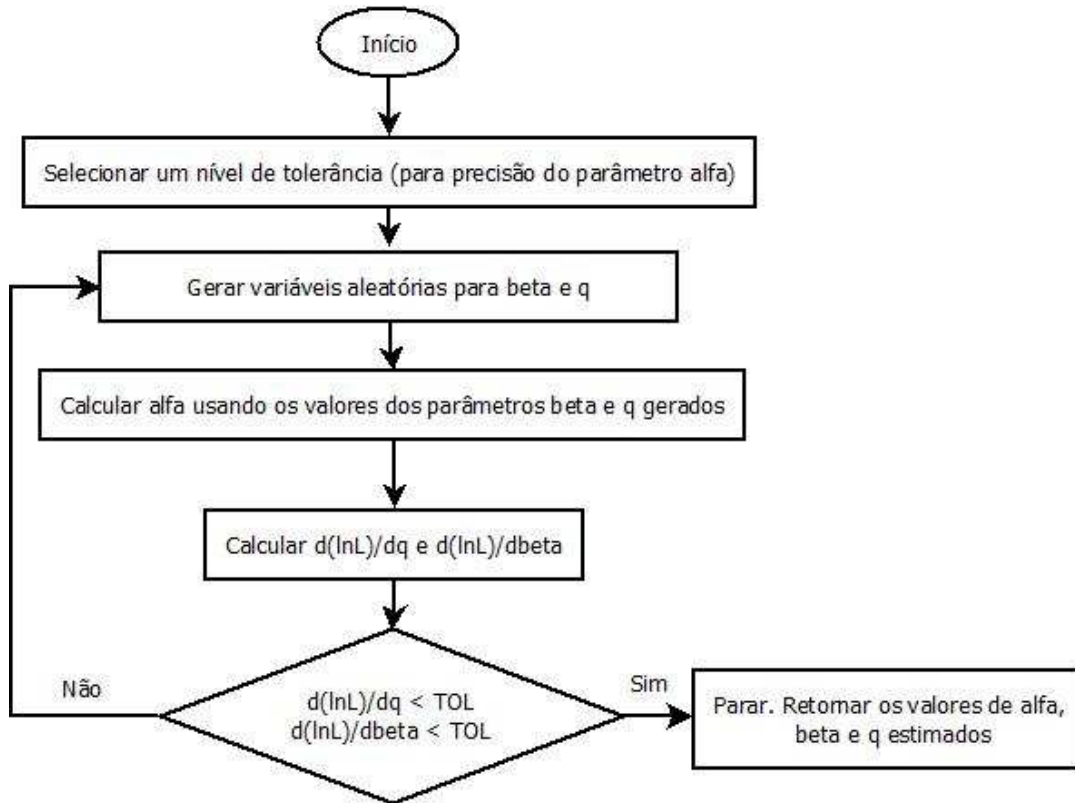


Figura 2.7-Fluxograma para a obtenção dos EMV's
 Fonte: Adaptado de Yañez, Joglar & Modarres (2002)

Com a conclusão dessa etapa, são posteriormente encontrados os tempos entre falhas e o número esperado de falhas do sistema. Ademais, antes de finalizar toda a estimação é necessário validar o que já foi feito ((etapa v do EMV's).

Na estimação do primeiro tempo de falha deve-se empregar a função confiabilidade $R(t)$, essa expressa a probabilidade de a unidade apresentar sucesso na operação (FOGLIATO; RIBEIRO, 2009). Como os tempos entre falhas seguem uma distribuição Weibull, então a Equação 2.22 expõe o primeiro tempo de falha do sistema.

$$F(t) = 1 - \exp - \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (2.22)$$

A Equação 2.22 é idêntica à Equação 2.15, no que diz respeito ao tempo da primeira falha, uma vez que nesse período, do início do sistema até a ocorrência da primeira falha, não existe interferência do parâmetro q . Da segunda falha em diante é apenas empregada a Equação 2.15 para determinar os tempos entre falhas do sistema, pois passa a incorporar as idades virtuais do PRG. Novamente, é utilizada a técnica de Simulação de Monte Carlo para determinar o número esperado de falhas que o sistema terá. O fluxograma da Figura 2.8 resume todo esse procedimento.

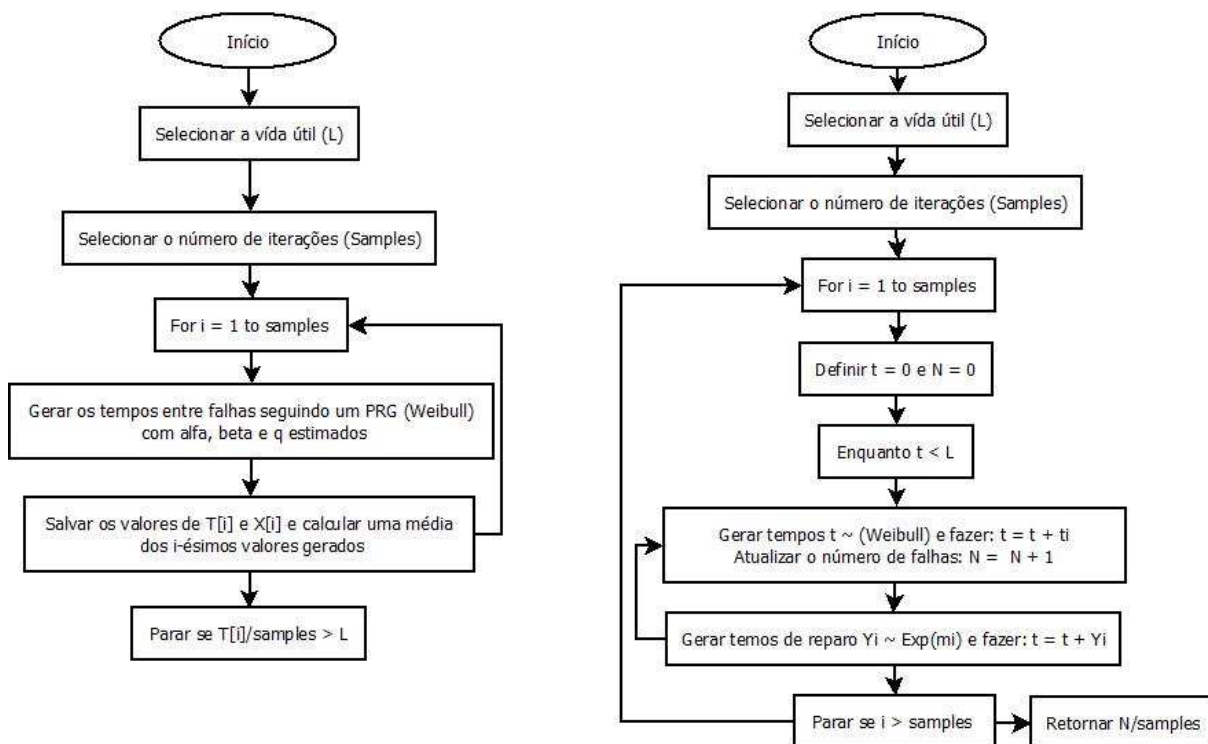


Figura 2.8– Fluxograma Descrevendo os Algoritmos para Estimar os Tempos entre Falhas (à esquerda) e o Número Esperado de Falhas (à direita)

Fonte: Adaptado de Yañez, Joglar & Modarres (2002)

Ao se determinar o número esperado de falhas, visualizado pela parte da direita da Figura 2.8, também se realizando um teste de validação dos resultados encontrados, para saber se os resultados simulados se comportam de maneira similar ou análoga aos dados reais.

Por último, método de estimação proposto por Yañez, Joglar & Modarres (2002) explica que os estimadores para os parâmetros do PRG também podem ser aplicados na estimação dos parâmetros do PR e do PNHP, o que os torna como casos especiais do PRG.

2.4 Terceirização da manutenção

Em muitos negócios existe uma tendência de visualizar a manutenção como uma atividade secundária, não sendo configurada uma competência fundamental da organização. Deste modo, a sua terceirização, seja em nível total ou parcial, é uma alternativa implementada por várias empresas.

Murthy, Karim & Ahmadi (2015) afirmam que antes de realizar tal processo, algumas questões precisam ser previamente esclarecidas, tais como:

1. Há um conjunto bem definido de objetivos de negócios que são viáveis?
2. A terceirização faz sentido para organização?
3. A empresa está pronta para receber a terceirização?

4. Quais são as alternativas para a terceirização (existe outra possibilidade)?
5. Quais atividades devem ser terceirizadas?
6. Como deve ser selecionado o melhor agente externo (a empresa contratada)?
7. Quais são as táticas de negociação para a formação contrato?
8. Como decidir sobre as taxas/cláusulas do contrato?
9. Como decidir questões como penalidades e/ou incentivos no contrato?
10. Quais sistemas são necessários para um monitoramento efetivo da atividade terceirizada?
11. Quais os potenciais riscos?

Além da consideração desses fatos, Murthy (2000) afirma que existem duas desvantagens na terceirização da manutenção:

1. Redução o conhecimento da organização sobre as tarefas relacionadas à manutenção;
2. Torna-se dependente de um único prestador de serviço.

Ressalta-se que para produtos muitos especializados e específicos, formado por diversos componentes (ou elementos), a execução da manutenção, em muitos casos só pode ser executada pelo seu fabricante original, pois ele detém o domínio das ferramentas necessárias para realizar o reparo, bem como, possui o *know how* sobre o dispositivo. Logo, o cliente é forçado a realizar a manutenção com o fabricante (MURTHY; JACK, 2014).

2.4.1 Terceirização da manutenção de equipamentos hospitalares

Os equipamentos médicos são componentes fundamentais das modernas instituições de saúde, esses são usados para realizar diagnósticos, intervenções, pesquisas, estudos, monitoramentos e tratamento de pacientes. Com o avanço da tecnologia ao longo das últimas décadas refletiram uma maior sofisticação e modernização de tais dispositivos, ampliando assim a sua capacidade de serviço. Entretanto, dado o extenso portfólio torna-se virtualmente impossível para a equipe interna hospitalar propiciar o suporte necessário a todos os itens clínicos (CALIL; TEIXEIRA, 2002).

Sendo assim, a manutenção e o suporte de equipamentos médicos pode ser executada por diversos entes; o fabricante do equipamento, os serviços internos de manutenção (departamento de manutenção hospitalar) e algum agente livre (externo). Cada um, apresenta vantagens e desvantagens que estão relacionadas ao risco clínico de falha do equipamento, se o tempo de funcionamento do dispositivo é crítico, disponibilidade de substituição (se existe algum equipamento similar que desempenha a mesma função), complexidade do equipamento, o nível

de conhecimento do time da manutenção, peças de reposição, grau de relacionamento com o fabricante do equipamento e relação de proximidade com o agente ou fabricante (WILSON; ISON; TABAKOV, 2013).

No que tange às vantagens de se optar pela terceirização da manutenção de equipamentos clínico- hospitalares, Smithson & Dickey (2004) citam as seguintes:

- Desejo de reduzir o número de empregados. Uma vez que esses impactam diretamente na folha de pagamento do hospital;
- Economia de custos. Muitos pacotes de terceirização são vendidos e justificados quando se analisa o seu custo total, uma vez que o fabricante do equipamento possui peças e mão de obra interna para executar os serviços de manutenção, tal situação é especialmente evidenciada para equipamentos de alta complexidade;
- Acesso a recursos que não estão facilmente disponíveis para o dono do equipamento. Por exemplo, uma equipe treinada para a execução do serviço, acesso a peças de reposição, suprimentos e *softwares*. Na realidade, os pacotes de terceirização têm desenvolvido políticas personalizadas para os seus diferentes clientes, sendo implementadas a um baixo custo;
- A empresa terceirizada pode solucionar no curto prazo algum problema do departamento de manutenção do cliente. Essa situação ocorre uma vez que o departamento interno possui um número limitado de funcionários, enquanto a empresa contratada dispõe de recursos, os quais podem estar subutilizados. Logo, a empresa contratada é capaz de fornecer apoio ao cliente;
- Redução de custos operacionais para a empresa contratante relacionados a pedidos de faturas. Um pacote de terceirização ajuda a reduzir as despesas relacionadas à compra de peças de reposição, suprimento e serviços individuais de reparo, deste modo ganha-se agilidade em solucionar os problemas pela redução da burocracia.

2.4.2 Concepção dos contratos de manutenção e o papel da garantia

O estudo dos contratos de manutenção e da garantia são importantes nas perspectivas do cliente e do fabricante. Dependendo dos termos da garantia e/ou do prazo do contrato de manutenção, o fabricante pode incorrer em prejuízo após a venda do seu produto ou o cliente pode não comprar o produto. Além disso, a possibilidade de existir uma garantia adicional pode acarretar em novas estratégias aos participantes na negociação.

Conceitualmente, um contrato de manutenção é um documento que cria um vínculo entre as partes envolvidas, o proprietário do equipamento e o responsável pela provisão da manutenção (fabricante ou algum agente externo), envolvendo questões técnicas, econômicas/financeiras e jurídicas. Murthy, Karim & Ahmadi (2015) especificam esses assuntos:

- Questões técnicas: os tipos de operações da manutenção a serem executadas (ações corretivas e/ou preventivas), os detalhes das tarefas a serem feitas, as peças/componentes empregados na manutenção e tempo de retorno do equipamento ao estado operacional. É importante mencionar também as condições de operacionalidade do equipamento e a intensidade de sua utilização ao longo da vida útil.
- Questões econômicas/financeiras: as estruturas de pagamento a serem implementadas (preço fixo ou preço variável), penalidades associadas ao *delay* em retornar o equipamento ao estado operacional, riscos e incertezas.
- Questões jurídicas: garantia do equipamento, a forma de resolução de conflito caso alguma parte envolvida na negociação se sinta lesada/prejudicada (podendo estar relacionado ao risco moral), os termos e a duração do contrato.

Calil & Teixeira (2002) citam dois tipos de contratos de manutenção aplicados a equipamentos hospitalares; contratos de serviço por períodos determinados e contratos de serviço sob demanda.

- O contrato de serviços por período geralmente inclui a manutenção corretiva (com opção de ter também a manutenção preventiva) no valor do contrato. Tal tipo de negociação é mais empregada para equipamentos mais sofisticados, de alta complexidade, em virtude do oneroso custo de treinamento, dificuldade na obtenção das peças de reposição, necessidade de teste de calibração e salário diferenciado a ser pago ao técnico não justificar a manutenção interna.
- Quanto às formas de contrato de serviço sob demanda, destaca-se o contrato com uma empresa específica. Nesse tipo de documento, há um contrato formal com um determinado prestador de serviço, que é pago pela manutenção corretiva somente quando ocorrer a quebra do equipamento, não existindo a obrigatoriedade de um pagamento mensal, como é o caso de contratos de serviço por período. Finalmente, esse tipo de contrato é sugerido para equipamentos de média e baixa complexidade, que raramente quebram e não está inclusa a manutenção preventiva.

Em relação ao papel da garantia, essa representa uma certificação do fabricante ao comprador do seu produto ou serviço que é celebrado após a venda do produto. O seu propósito é de estabelecer a responsabilidade ao ofertante, caso ocorra uma possível eventualidade, se o item vendido ficar avariado ou incapaz de desempenhar a sua função requerida. Deste modo, a garantia deve assegurar ao consumidor que o produto obtido desempenhará as funções pretendidas, sob determinadas condições de uso, por um período de tempo especificado, logo, a garantia assemelha-se à ideia de um seguro (MURTHY, 2000).

Blischke & Murthy (1994 e 1996) explicam os diversos tipos de políticas garantia e suas respectivas classificações. Tais autores mostram cinco diferentes tipos de categorias em que a garantia pode estar inserida:

- Possibilidade melhoria ou não da confiabilidade do item;
- Ser feita para um único item ou para um grupo de itens (garantia cumulativa);
- Está relacionada a um ponto, isto é, uma dimensão ou múltiplas dimensões, por exemplo: agregar a idade e as condições de uso do equipamento;
- O item ser passível ou não de substituição;
- Se a garantia pode ou não ser prorrogada ou se essa está relacionada a alguma base de dados (conter informações sobre os acidentes ocorridos ao longo do período da garantia).

Para o fabricante, a partir do momento em que ele opta por oferecer a garantia aos seus produtos, implica na adesão de vários custos (peças de reposição, materiais de trabalho, mão-de-obra e etc.), derivados da atividade de manutenção. Esses dispêndios são variáveis aleatórias, pois as falhas ao longo do período de garantia também são eventos não-determinísticos (MURTHY, 2000). Por consequência, a partir do momento em que o fabricante opta por disponibilizar a garantia estendida, o seu custo torna-se estocástico.

Um outro ponto ligado ao conceito de garantia é a prática da garantia estendida. Essa é de cunho opcional e representa uma cobertura adicional, passando a vigorar após a expiração do prazo normal de garantia. Sua obtenção dar-se-á mediante a um pagamento extra (prêmio) do cliente ao fabricante. Desse modo, corresponde a um custo adicional do consumidor ao adquirir o produto desejado (MURTHY, 2000).

Por fim, devido à popularidade e à rentabilidade financeira que a garantia estendida tem oferecido ao longo das últimas décadas, muitos agentes externos (instituições financeiras, seguradoras e operadores independentes) estão fornecendo esse tipo de serviço. Ademais, os

fabricantes têm reduzido consideravelmente a garantia básica, no intuito de forçar o cliente a escolher a garantia estendida (MURTHY, 2000).

2.4.3 Modelagem matemática de um contrato de manutenção

Diversos autores têm modelado *frameworks* teóricos de contratos de manutenção e garantia estendida ao longo das duas últimas décadas, os quais podem ser vistos, com detalhes, em Murthy & Jack (2014). Dentre esses trabalhos, esta dissertação explica o estudo desenvolvido por Murthy & Asgharizadeh (1998). Tais autores analisam as estratégias de um cliente e um prestador de serviço (ou agente), no que diz respeito à possibilidade de adesão de um contrato de serviço de manutenção.

De forma geral, tais autores desenvolveram sob a perspectiva de um jogo de Stackelberg, um problema de decisão entre o cliente e o agente de manutenção, a decisão a ser tomada pelo consumidor em relação à forma de manutenção requerida pelo equipamento adquirido. A estrutura do problema é a seguinte: o agente se propõe a vender um equipamento ao cliente pelo preço $C_b (>0)$, se esse for adquirido o proprietário receberá uma receita $R (>0)$, por unidade de tempo, enquanto o item estiver sob estado operacional e zero se estiver danificado.

Paralelamente à venda do produto, o agente proporciona duas opções para a execução da manutenção; uma delas corresponde à adesão de um contrato de serviço e a outra é sem o contrato de serviço. Em ambas as opções de reparo, apenas manutenções corretivas são realizadas no dispositivo. Sendo assim, o reparo sempre ocorre depois da quebra do equipamento.

Na primeira opção, contrato por serviço, o agente efetuará todas as manutenções a um preço fixo $P (>0)$, ao longo de um período de tempo estabelecido (L) e o cliente não incorrerá em nenhum custo adicional. Adicionalmente, existirá uma sanção associada ao tempo de reparo (Y), caso esse venha a ser superior a um tempo τ predeterminado. A multa corresponde a uma compensação financeira revertida ao proprietário do equipamento devido ao tempo de não operacionalidade do item. A estrutura da penalidade pode ser vista na Equação 2.23:

$$\theta (Y_i - \tau), \text{ desde que } Y_i > \tau, Y_i \text{ é o tempo de reparo } i. \quad (2.23)$$

em que θ é o custo da penalidade associada a demora da conclusão da manutenção.

Na segunda opção, sem o contrato de serviço, o agente realizará a manutenção do equipamento e cobra um preço unitário por intervenção $C_s (>0)$, não existindo nenhum tipo de penalidade. Além das duas opções, existe a possibilidade de o cliente não comprar o item, essa

situação decorre quando o custo de adquirir o equipamento, somado à forma da manutenção implicar em prejuízo financeiro.

As hipóteses adicionais são as seguintes:

- O tempo da primeira falha do equipamento é distribuído exponencialmente, com média $1/\lambda$;
- $N(L)$, o número de vezes que o equipamento falha, é distribuído via Poisson, com média λL ;
- Nesse problema de decisão, o agente comporta-se de maneira análoga ao líder, enquanto que o cliente se comporta de maneira análoga ao seguidor;
- O valor esperado do tempo de reparo é muito pequeno ao ser comparado ao tempo médio entre falhas, $E(Y) \ll MTBF$, portanto pode ser desprezado. Logo, a receita do cliente pode ser aproximada para RL ;
- O reparo que o equipamento recebe é do tipo perfeito, isto é, o sistema sempre é restaurado à condição de novo após a ocorrência da manutenção.
- O tempo incorrido pelo prestador de serviço em realizar a manutenção é distribuído exponencialmente, com média $1/\mu$;
- O problema é caracterizado por ser de informação completa e perfeita, isto é, os jogadores sabem todas as ações realizadas no passado, os *payoffs* decorrentes das decisões a serem executadas, o cliente sabe a confiabilidade do equipamento adquirido e o agente sabe as características do cliente.

2.4.3.1 Problema de decisão do cliente

A decisão do cliente em relação à adesão do contrato de serviço ou não está relacionada aos seguintes fatores: confiabilidade do equipamento, P , C_s e o parâmetro de aversão ao risco (γ). A aversão ao risco é relacionado ao fato de $N(L)$ ser um processo estocástico, por consequência, o seu valor não pode ser dito com exatidão. Partindo disso, a escolha do cliente associada ao γ é apresentada pela função utilidade $U(w)$:

$$U(w) = \left(\frac{1 - e^{-\gamma w}}{\gamma} \right), \quad (2.24)$$

em que w é a riqueza associada ao indivíduo.

A Equação 2.24 mostra que conforme o parâmetro γ tende a 0, o cliente é neutro ao risco. Nessa situação, a utilidade é igual à riqueza, $U(w) = w$. Conforme o nível de aversão ao risco cresce, mantida constante um determinado nível de riqueza, menor será a utilidade do indivíduo. A Figura 2.9 analisa a relação entre o γ e $U(w)$, para $w = 2$.

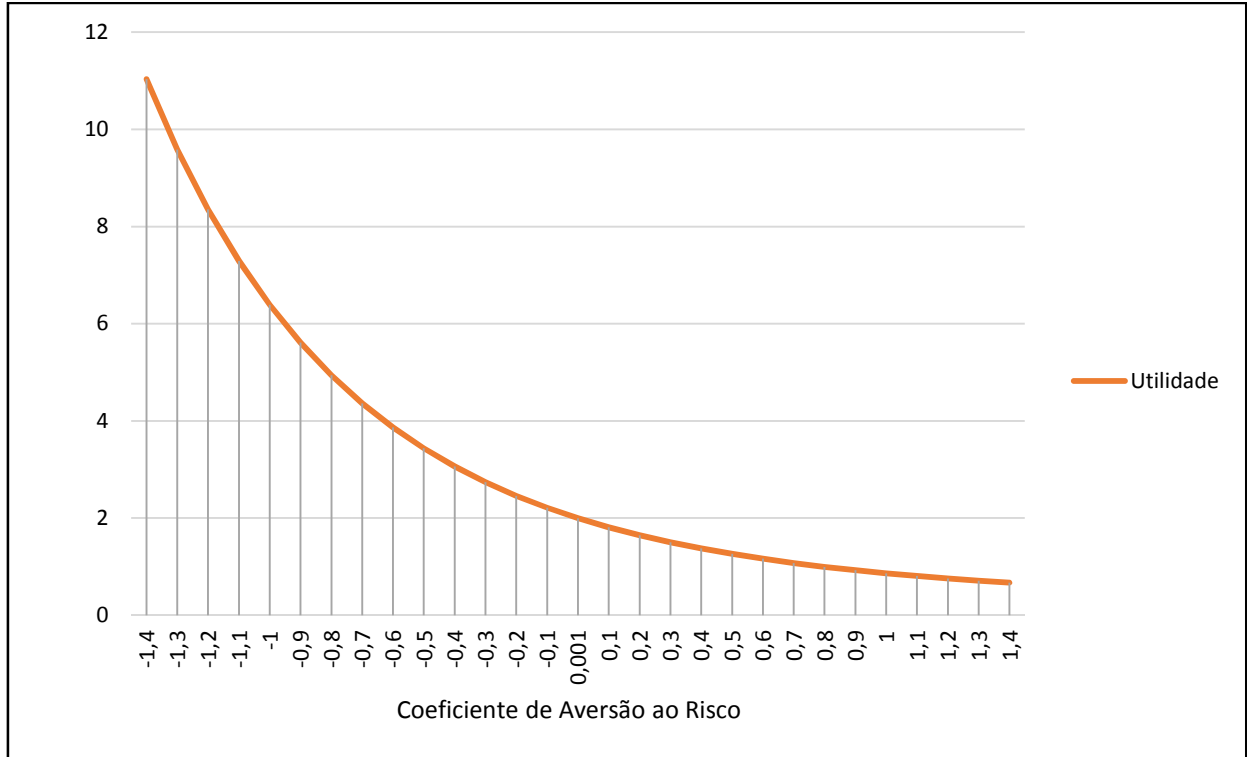


Figura 2.9- Relação entre a Utilidade com o Parâmetro de Aversão ao Risco
Fonte: Esta pesquisa (2016)

A decisão do consumidor (A_k) para as opções oferecidas pelo agente estão resumidas abaixo.

- A_0 – não compra o equipamento;
- A_1 – compra o equipamento e escolhe a opção de contrato de serviço;
- A_2 – compra o equipamento e escolhe a opção sem contrato de serviço.

Desta forma, o lucro esperado do cliente denotado por $L(A_k)$, com $k = 0, 1$ e 2 , corresponde as Equações 2.25, 2.26 e 2.27:

$$L(A_0) = 0 \quad (2.25)$$

$$L(A_1) = RL + \theta[\sum_{i=0}^N \max\{0, Y_i - \tau\}] - P - C_b \quad (2.26)$$

$$L(A_2) = RL - C_b - N(L)C_s \quad (2.27)$$

A escolha ótima do cliente (A_k^*) é feita a partir de uma análise comparativa entre suas possíveis decisões (A_0, A_1, A_2), dada uma estrutura de preços imposta pelo agente. Uma vez que o consumidor busca maximizar a sua utilidade⁹, deve-se substituir as Equações de lucro

⁹ **Maximizar a Utilidade** representa um dos pressupostos fundamentais na teoria microeconômica, mais detalhes ler Varian (2010).

esperado (2.25, 2.26 e 2.27) na função utilidade (Equação 2.24) para saber a opção que maximiza a utilidade esperada. Essa variável é mostrada pelas Equações 2.28, 2.29 e 2.30:

$$\text{Se } A_k = A_0, \text{ então: } E(U_c) = 0 \quad (2.28)$$

$$\text{Se } A_k = A_1, \text{ então: } E(U_c) = \left(\frac{1}{\gamma}\right)(1 - e^{-\gamma(RL - C_b - P) + \lambda L e^{-\mu\tau}(\mu/\gamma\theta + \mu) - 1}) \quad (2.29)$$

$$\text{Se } A_k = A_2, \text{ então: } E(U_c) = \left(\frac{1}{\gamma}\right)(1 - e^{-\gamma(RL - C_b) - \lambda L(1 - e^{\gamma C_s})}) \quad (2.30)$$

2.4.3.2 Problema de decisão do agente

Para a escolha A_k do cliente, o lucro esperado do agente, $\delta(P, C_s, A_k)$ corresponderá às Equações 2.31, 2.32 e 2.33:

$$\text{Se } A_k = A_0, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_0) = 0 \quad (2.31)$$

$$\text{Se } A_k = A_1, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_1) = P + C_b - \theta[\sum_{i=0}^N \max\{0, Y_i - \tau\}] - N(L)C_r \quad (2.32)$$

$$\text{Se } A_k = A_2, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_2) = C_b + (C_s - C_r)N(L), \quad (2.33)$$

em que, C_r representa o custo monetário do agente em realizar o serviço de manutenção.

Ressalta-se que para qualquer escolha A_k do cliente, o lucro do agente sempre é estocástico, uma vez que na composição do seu *payoff* existem $N(L)$ e/ou Y . Na opção A_1 , a receita do prestador de serviço corresponde a um valor determinístico ($P + C_b$), entretanto, o fato de existir uma multa relacionada ao tempo de serviço da manutenção (regido por um PHP) implica um resultado financeiro final aleatório. Na opção A_2 , o lucro do agente também é estocástico porque a receita e o custo dependem de $N(L)$.

A partir das Equações 2.31, 2.32 e 2.33, o lucro esperado do agente é:

$$\text{Se } A_k = A_0, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_0) = 0 \quad (2.34)$$

$$\text{Se } A_k = A_1, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_1) = P + C_b - \lambda L \left[C_r + \left\{ \frac{\theta e^{-\mu\tau}}{\mu} \right\} \right] \quad (2.35)$$

$$\text{Se } A_k = A_2, \text{ então: } \delta(P, C_s, A_2) = C_b + (C_s - C_r)\lambda L \quad (2.36)$$

2.4.3.3 Equilíbrio do modelo

O equilíbrio desse problema de decisão está diretamente relacionado aos valores máximos atribuídos ao cliente para a estrutura de preços imposta pelo agente. Deste modo, $\bar{P}$ corresponde ao valor máximo que o cliente está disposto a pagar para obter o contrato de serviço (preço de reserva para aderir a opção A_1) e $\bar{C}_s$ corresponde ao valor máximo que o cliente está disposto a pagar pelo serviço sem contrato (preço de reserva para aderir a opção A_2). Matematicamente, tais preços podem ser visualizados pelas Equações 2.37 e 2.38, respectivamente:

$$\bar{P} = RL - C_b - (\lambda L/\gamma)e^{-\mu\tau} \left[\left(\frac{\mu}{\gamma\theta + \mu} \right) - 1 \right] \quad (2.37)$$

$$\bar{C}_s = (1/\gamma) \ln\{1 + \gamma(RL - C_b)/(\lambda L)\} \quad (2.38)$$

tais equações são obtidas da seguinte maneira:

- Preço de reserva do cliente para o contrato do serviço de manutenção, esse é encontrado ao igualar a Equação 2.32 a zero e isolar o valor de P, com isso se encontra a sua disposição máxima de pagamento;
- Preço de reserva do cliente para a manutenção sem contrato de serviço, esse é encontrado ao igualar a Equação 2.33 a zero e isolar o valor de C_s , com isso se encontra a sua disposição máxima de pagamento.

A estratégia ótima do cliente dar-se-á da seguinte maneira: para o par (P, C_s) proposto pelo agente, o consumidor analisará as suas utilidades esperadas (Equações 2.28, 2.29 e 2.30) e escolherá a alternativa A_k^* que lhe garantirá o maior *payoff* esperado.

A Figura 2.10 apresenta o plano $P - C_s$; nessa imagem, pode-se visualizar graficamente a escolha do cliente. Os preços de reserva $(\bar{P}, \bar{C}_s)$ delimitam os limites das três regiões mutuamente exclusivas de tomada de decisão $(\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2)$, mostrando as possíveis estratégias a serem tomadas pelo consumidor. A curva Γ separa as regiões Ω_1 e Ω_2 e representa o ponto de indiferença entre as opções A_1 e A_2 .

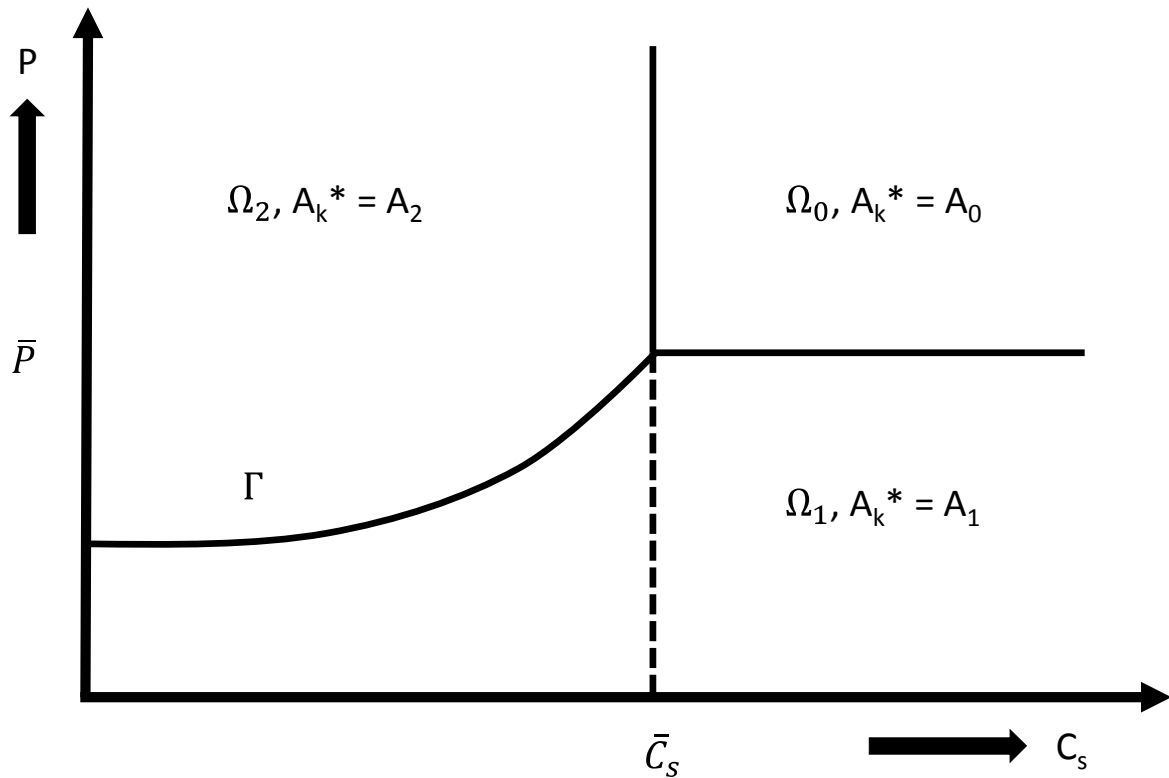


Figura 2.10- Plano $P - C_s$
 Fonte: Adaptado de Murthy & Asgharizadeh (1998)

Se o par (P, C_s) estiver dentro da região Ω_0 , então a escolha do cliente é de não adquirir o equipamento, caso o par (P, C_s) esteja dentro da região Ω_1 , então a escolha do cliente é de adquirir o equipamento com a opção de contrato de serviço. Por fim, se o par (P, C_s) estiver dentro da região Ω_2 , então a escolha do cliente é de comprar o equipamento sem a opção de contrato com serviço.

Ademais, com base nos valores de $\bar{P}$ e $\bar{C}_s$, a estratégia ótima do agente está na determinação de uma estrutura de preços que maximize o seu lucro esperado. O prestador de serviço ao analisar as suas opções de lucro esperado (Equações 2.34, 2.35 e 2.36) e optará pela combinação $(\bar{P}, \bar{C}_s)$ que lhe garanta o maior *payoff*.

Uma vez que o problema é de informação completa, o agente sabe o $\bar{P}$ e $\bar{C}_s$ do cliente. Desta forma, para a opção mais conveniente, o prestador de serviço sempre a colocará como a disposição máxima de pagamento que o cliente esteja propenso a pagar, enquanto que para a outra opção, o preço será superior ao preço de reserva. Por exemplo; se na opção A_1 o lucro do agente é maior do que nas opções A_0 e A_2 , então a estrutura de preço a ser imposta pelo agente é a seguinte: $P = \bar{P}$ e $C_s > \bar{C}_s$, como resultado, o consumidor opta pelo contrato de serviço.

O equilíbrio de Nash para esse problema de decisão pode ser entendido da seguinte forma: a opção que garante o maior lucro esperado para o prestador de serviço representa a escolha ótima do cliente. Isto é, se o cliente optar pelo contrato de serviço ou pelo serviço sob demanda, ele não terá excedente do consumidor e a sua utilidade esperada será igual a zero. Tal situação ocorre devido ao prévio conhecimento do agente sobre os preços de reserva do cliente, os quais são fundamentais na escolha a ser tomada pelo consumidor. Essa situação pode ser comparada com a prática de discriminação de preços de primeiro grau realizada no monopólio, ou seja, a empresa cobra o preço de reserva que o indivíduo está disposto a pagar por unidade adquirida de um bem ou serviço (PINDYCK; RUBINFELD, 2009).

2.4.3.4 Limitações na modelagem proposta por Murthy & Asgharizadeh (1998)

De forma geral, as limitações que o trabalho apresenta, em relação à confiabilidade, estão relacionada a três pontos interligados: a distribuição de probabilidade do tempo entre falhas, a não ocorrência de degradação do equipamento e a suposição do reparo perfeito.

Uma das hipóteses assumidas no modelo corresponde ao fato dos tempos entre falhas serem distribuídos exponencialmente, tal suposição é factível para alguns componentes elétricos (FOGLIATO & RIBEIRO, 2009) e não se aplica à maioria dos equipamentos,

incluindo os equipamentos hospitalares. Dentre as características que a distribuição Exponencial¹⁰ possui, a presente dissertação enfatiza a seguinte: ausência de memória.

Matematicamente, essa propriedade é derivada da probabilidade condicional:

$$P\{H > t + \Delta t | H > \Delta t\} = P\{H > t\}, \quad (2.39)$$

em que H corresponde a uma variável aleatória distribuída exponencialmente. Sendo assim, a distribuição probabilística do tempo remanescente até o evento ocorrer é sempre a mesma, independente de já tiver passado. Logo, a Equação 2.39, admitindo uma distribuição exponencial, é escrita da seguinte forma:

$$P\{H > t + \Delta t | H > \Delta t\} = e^{-\alpha t} \quad (2.40)$$

Outro ponto relacionado a propriedade de falta de memória da distribuição Exponencial é o fato do equipamento não se desgastar ao longo do tempo (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2011).

Finalmente, o reparo perfeito, como dito na seção 2.3, corresponde a uma situação simplista e pouco encontrada na prática na manutenção de equipamentos. Conclui-se que para um contexto hospitalar, a proposta de Murthy & Asgharizadeh (1998) precisa ser adaptada, uma vez que a maioria dos equipamentos está sujeito à degradação. Tal fato decorre da modernização e sofisticação dos dispositivos médicos, os quais são formados por diversos componentes e associados a uma tecnologia de ponta, a utilização do PRG para modelar a estrutura falha-reparo é uma melhor maneira de trazer esse problema dentro da realidade clínico-hospitalar.

¹⁰ Mais detalhes sobre a **Distribuição Exponencial**, recomenda-se ler Hillier & Lieberman (2009).

3 APRESENTAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo, serão explicados os detalhes do modelo que é utilizado pelos jogadores no processo de tomada de decisão. Enfatiza-se que a presente metodologia é aplicada dentro de um ambiente hospitalar. Sendo assim, a instituição de saúde deverá optar por escolher ou não a garantia estendida, dado que o equipamento médico é sujeito ao reparo imperfeito regido pelo PRG.

Antes de expor os detalhes do modelo, menciona-se que o *framework* da garantia estendida de equipamentos hospitalares é constituído por seis elementos: o hospital (o proprietário do equipamento hospitalar e cliente do serviço da manutenção), o fabricante do produto (o responsável pela venda do equipamento hospitalar e pela execução da manutenção), as características do equipamento hospitalar, a política de manutenção envolvida, a qualidade do reparo e o prazo da garantia.

3.1 Descrição do problema

O problema de decisão apresentado é classificado como dinâmico, pois ambos os jogadores (o fabricante do equipamento e o hospital) realizam uma ação e de maneira sequencial, similar ao jogo de Stackelberg. O modelo é estruturado num ambiente não cooperativo, isto é, cada ente age individualmente em prol do seu próprio benefício, não existe coalizão e não há barganha entre as partes envolvidas, isto é, a partir do momento em que as decisões são tomadas elas não podem ser alteradas.

De maneira semelhante na seção 2.4, ao trazer o problema de contrato de serviço para o ambiente hospitalar, o fabricante ao vender um dispositivo médico para a instituição de saúde, também oferece duas possibilidades para a execução da manutenção: a garantia estendida, assemelhando-se com a opção de contrato de serviço (A_1), e o serviço sob demanda, assemelhando-se com a opção sem contrato de serviço (A_2). Em ambas as opções, o fabricante é responsável pelo provisionamento das peças sobressalentes, serviços de calibragem e a equipe de trabalho.

A dinâmica do problema é vista pela seguinte sequência de etapas:

- Na primeira etapa, o fabricante propõe a venda de um equipamento para o hospital e também oferece duas opções para a execução da manutenção, com e sem garantia estendida, representado pelas opções A_1 e A_2 respectivamente;

- A segunda etapa corresponde à decisão a ser realizada no hospital: comprar o equipamento com ou sem garantia estendida, ou não comprar;
- Na última etapa, conforme a decisão realizada pelo hospital, os *payoffs* serão definidos para ambos os jogadores com base em suas funções objetivos.

A Figura 3.1, expõe a linha temporal do jogo proposto:

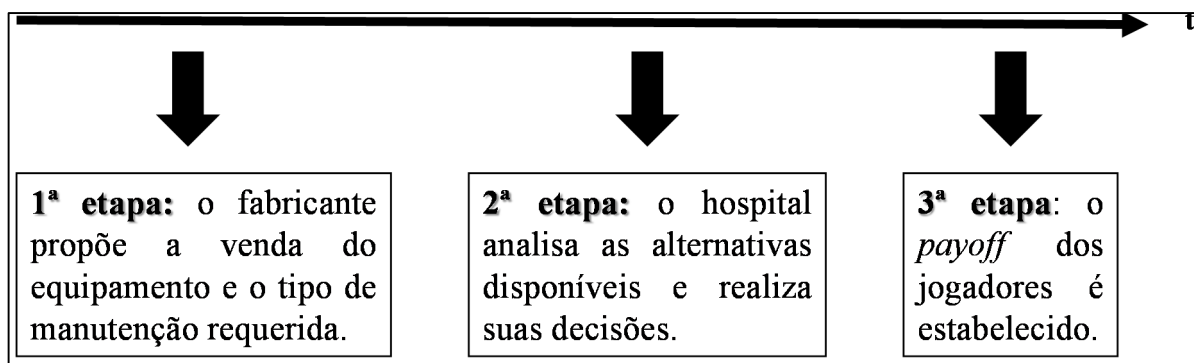


Figura 3.1- Linha do Tempo do Jogo Proposto

Fonte: Esta pesquisa (2016)

3.2 Hipóteses do modelo

A maioria das hipóteses do modelo são semelhantes às suposições feitas por Murthy & Asgharzadeh (1998), entretanto, as principais diferenças estão relacionadas a confiabilidade do equipamento. Abaixo são detalhadas todas as hipóteses que constituem o presente modelo:

- O fabricante é considerado neutro ao risco, ou seja, o seu *payoff* corresponde a sua própria função lucro, enquanto que a decisão do hospital é determinada com base na sua função utilidade, representada pela Equação 2.24;
- Os tempos entre falhas são variáveis aleatórias com distribuição Weibull;
- As falhas do equipamento são críticas, isto é, inviabilizam a operacionalidade do equipamento;
- O fabricante apenas realiza manutenções corretivas e a qualidade do reparo está relacionada ao parâmetro q de rejuvenescimento, evidenciando assim, o reparo imperfeito;
- O PRG é empregado na modelagem probabilística do processo falha – reparo do item;
- O tempo de reparo é estocástico, assumido ter uma distribuição Exponencial com média μ ;
- $E(Y_i) \ll MTBF$. Essa suposição implica que o valor esperado do tempo de reparo é muito pequeno ao ser comparado ao tempo médio entre falhas e pode ser desprezado.

Deste modo, a receita total gerada pelo equipamento ao longo de sua vida útil pode ser aproximada a RL ;

- Designação de papéis: o fabricante comporta-se de maneira análoga ao líder e o hospital comporta-se de maneira similar ao seguidor;
- O fabricante e o hospital apresentam informação completa em relação aos parâmetros do modelo. Isso implica que o prestador de serviço conhece o parâmetro de risco do cliente, enquanto que o cliente sabe a função de intensidade de falha do equipamento e a qualidade do reparo.

3.3 Utilização da distribuição Weibull nos tempos entre falhas do equipamento hospitalar

Uma das hipóteses do modelo é relacionada aos tempos entre falhas do equipamento hospitalar serem regidos por meio de uma distribuição Weibull. Essa distribuição é amplamente utilizada devido a sua flexibilidade em modelar sistemas com número de falhas crescentes, decrescentes e constantes ao longo do tempo (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2011).

Como visto na Seção 2.3.2.1, essa distribuição de probabilidade é formada por dois parâmetros; α (>0), parâmetro de escala, e β (>0), parâmetro de forma. A partir de variações do β é possível observar a sua flexibilidade. Quando $\beta = 1$, a FDP da Weibull é idêntica à FDP da distribuição Exponencial e para o caso do $\beta = 3,6$, a FDP da Weibull se aproxima da FDP de uma distribuição normal (VERMA, SRIVIDYA, KARANKI; 2010).

Visualmente, a Figura 3.2 mostra a FDP da Weibull relacionada com as variações do β , para um $\alpha = 10$.

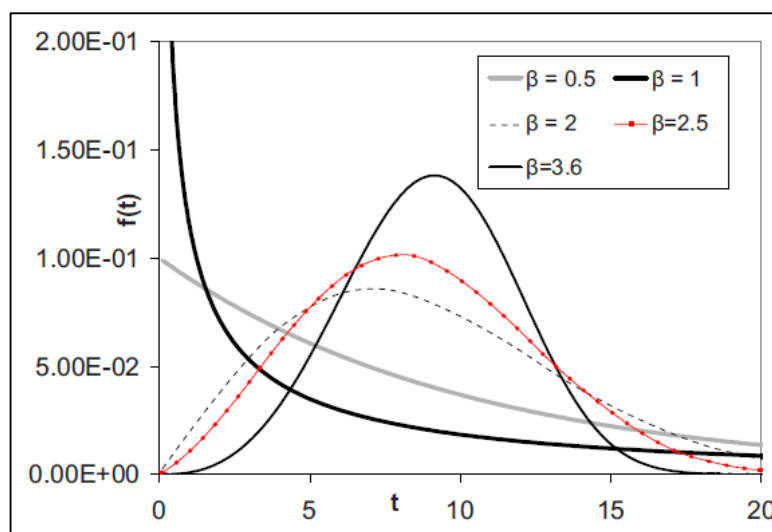


Figura 3.2--Relação entre a FDP da Weibull com o β
Fonte: Adaptado de Verma, Srividya & Karanki (2010)

Finalmente, tal distribuição é uma das mais úteis em engenharia de confiabilidade e na modelagem de vida útil de produtos, taxa de falha e tempos entre falhas (JIANG; MURTHY, 2011).

3.4 Problema de decisão do hospital

O problema de decisão do hospital é semelhante ao problema do cliente da Seção 2.4.3, entretanto a diferença principal corresponde à percepção da instituição de saúde em relação ao $N(L)$, pois, como o equipamento é sujeito a degradação ao longo do tempo e também ao reparo imperfeito, há diferença nos cálculos dessa variável aleatória. Logo, o q também afeta o conjunto decisório do hospital.

Outro ponto a ser destacado é a relação entre os parâmetros q e γ do hospital. É nítido que para um elevado q o número esperado de falhas também será alto, bem como, um baixo q implica um pequeno $N(L)$. Por consequência, se a instituição de saúde for bastante avessa ao risco e o q do fabricante for elevado (baixa qualidade na manutenção que resultará num elevado $N(L)$) é propício que o hospital escolha a opção A_1 .

Portanto, a decisão do hospital além de ser influenciada pela confiabilidade do equipamento, P , C_s e γ , passa agora a incorporar o q . Com a incorporação desse novo parâmetro, as equações da utilidade esperada do hospital $U_c(A_k, P, C_s, q)$ passam a ter um outro formato, os quais podem ser visualizados nas Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$\text{Se } A_k = A_0, \text{ então: } E(U_c) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Se } A_k = A_1, \text{ então: } E(U_c) = \left(\frac{1}{\gamma}\right) \left(1 - \left(e^{-\gamma(RL - C_b - P)}\right) * \right. \quad (3.2)$$

$$E[\varphi]), \text{ em que } E[\varphi] \text{ é: } E\left[e^{-\gamma\theta(\sum_{i=1}^N y_i - \tau)}\right], \text{ se } y_i > \tau.$$

$$\text{Se } A_k = A_2, \text{ então: } E(U_c) = \left(\frac{1}{\gamma}\right) (1 - e^{-\gamma(RL - C_b - N(L)C_s)}) \quad (3.3)$$

3.5 Problema de decisão do fabricante

O problema de decisão defrontado pelo fabricante também é similar ao problema do agente, descrito na Seção 2.4.3, isto é, ao vender um equipamento hospitalar para o seu cliente, também se oferecem duas possibilidades na execução da manutenção; adesão ou não da garantia estendida.

A principal novidade no problema de decisão do fabricante corresponde à adoção do parâmetro q em seu conjunto decisório, pois, é sabido que esse afetará a qualidade do reparo e

$N(L)$. Neste novo contexto, o fabricante deverá se concentrar nos pontos de eficácia e eficiência nas suas ações de reparo, caso ele deseje obter um lucro esperado elevado. A eficácia diz respeito ao ato de reparar o sistema, enfatizando a qualidade na restauração do item falho, e essa também influenciará o tempo da próxima falha do sistema. Por sua vez, a eficiência é relacionada com o modo que a manutenção foi feita, isto é, a velocidade com que o reparo é realizado (AZEVEDO, 2013). Logo, se o fabricante for rápido na execução do reparo, ele não incorrerá em multa e se for eficaz na realização dessa atividade, menos vezes, em média, o equipamento falhará, economizando o custo de efetuar manutenções.

Desta forma, o lucro esperado do fabricante $E[\delta(P, q, C_s, A_k^*)]$ está relacionado tanto com a escolha do cliente (A_k), como também aos valores de P , C_s e q . O *payoff* do prestador de serviço para o $K = 0, 1$ e 2 corresponderá as Equações 3.4, 3.5 e 3.6:

$$\text{Se } A_k = A_0, \text{ então: } E(\delta(P, C_s, q, A_0)) = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{Se } A_k = A_1, \text{ então: } E(\delta(P, C_s, q, A_1)) = P + C_b - E[MULTA] - N(L)C_r \quad (3.5)$$

$$\text{Se } A_k = A_2, \text{ então: } E(\delta(P, C_s, q, A_2)) = C_b + (C_s - C_r)N(L) \quad (3.6)$$

em que $E[MULTA]$ representa o valor esperado da compensação financeira que volta ao hospital. Esse montante é decorrente do *delay* em retornar o equipamento ao seu estado operacional.

3.6 Resolução do problema por meio do jogo de Stackelberg

Ao adaptar o presente problema de decisão como um jogo de Stackelberg, deve-se primeiramente saber como se dar a estruturação de poder entre as partes envolvidas. No ambiente da manutenção de equipamentos hospitalares, os fabricantes, em geral, também são os prestadores do serviço de manutenção (em alguns casos são exclusivos), pois apresentam uma equipe bem treinada para executar o reparo, peças de reposição, domínio da tecnologia e *softwares* para diagnóstico. Logo, eles auferem um maior poder de negociação e podem ser comparados com a empresa líder do jogo de Stackelberg. Quanto ao hospital, ele necessita ter o equipamento para a provisão de um bom serviço médico e a instituição de saúde não apresenta *expertise* na atividade da manutenção, logo ela é considerada como a empresa seguidora.

Quanto à maneira de se encontrar a solução do problema, ocorre uma similaridade com o trabalho proposto por Murthy e Asgharizadeh (1998). Inicialmente, o fabricante ao determinar a combinação de preços de P e C_s que maximiza o seu lucro, considerando os preços de reserva do cliente $(\bar{P}, \bar{C}_s)$, assemelha-se à empresa líder quando ela determina o seu nível de produção.

Já quando o hospital escolhe A_k que maximiza a sua utilidade esperada, ele se comporta de maneira análoga à empresa seguidora, dado que essa também observa previamente a ação da líder para posteriormente efetuar sua decisão, por meio da sua curva de reação.

A Figura 3.3 mostra a árvore do jogo de Stackelberg para o problema da garantia estendida entre o fabricante e o hospital, contendo todas as possíveis decisões que os jogadores envolvidos.

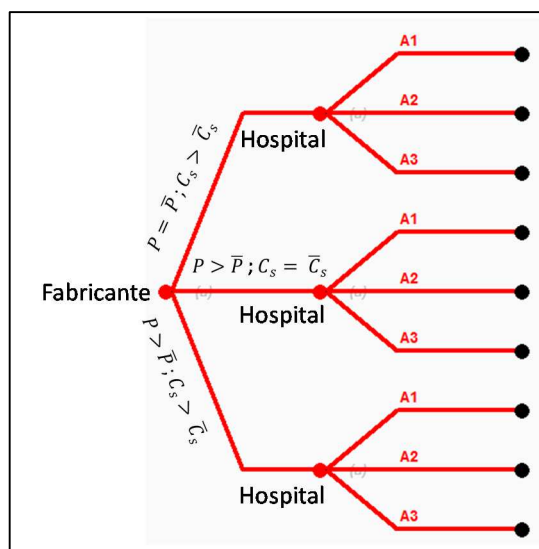


Figura 3.3- Árvore do Jogo de Stackelberg entre o Fabricante e o Hospital
Fonte: Esta pesquisa (2016)

Por fim, a Tabela 3.1 inter-relaciona a estrutura do jogo de Stackelberg com o modelo de garantia estendida para equipamentos hospitalares, realçando os seguintes aspectos: jogadores envolvidos, estrutura de poder, ações realizadas pelos jogadores, dinâmica do jogo, solução e equilíbrio.

Tabela 3.1- Relação entre o Jogo de Stackelberg e o Modelo de Garantia Estendida

	Jogo de Stackelberg	Modelo de Garantia Estendida
Jogadores Envolvidos	Duas empresas: uma denominada líder e outra é a seguidora.	Duas organizações: o fabricante do equipamento e o hospital.
Estrutura de Poder	Líder possui o poder.	Fabricante do equipamento possui o poder.
Ações realizadas pelos Jogadores	As empresas determinam a quantidade a ser produzida no mercado.	O fabricante determina o preço da garantia estendida e o do serviço sob demanda. O hospital determina a opção A_k que lhe traz o maior benefício.
Dinâmica do Jogo	A empresa líder determina inicialmente a quantidade	No primeiro período, o fabricante determina P e C_s ,

	que vai colocar no mercado. Posteriormente, a seguidora, ao observar a ação da líder, produz a quantidade maximiza o seu lucro.	considerando a disposição máxima de pagamento do hospital. No segundo momento, o hospital analisa a estrutura de preços e escolhe A_k .
Solução	Indução retroativa. Inicialmente encontra-se a quantidade que a seguidora deve produzir, dada a existência da líder. Posteriormente, determina-se a quantidade que a líder deve produzir.	Indução retroativa. Inicialmente encontra-se a disposição os preços de reserva do hospital ($\bar{P}$, $\bar{C}_s$). Posteriormente, o fabricante escolhe a estrutura de preços que maximiza o seu lucro e, por consequência, influencia na decisão do cliente.
Equilíbrio	A quantidade produzida pelo mercado, isto é, o somatório das produções da líder e da seguidora. Ambas as empresas recebem os <i>payoffs</i> decorrentes de suas ações.	É quando o cliente posteriormente ao comprar o equipamento escolhe o tipo de manutenção requerida. Ambas as organizações recebem os seus <i>payoffs</i> decorrentes de suas ações.

Fonte: Esta pesquisa (2016)

4 ANÁLISE DO MODELO

Neste capítulo são apresentadas as estratégias ótimas do hospital e do fabricante do equipamento hospitalar. Ademais, é proposto um exemplo numérico com os dados de falha e reparo de um Angiógrafo. A fim de garantir uma maior credibilidade ao modelo desenvolvido, são realizadas duas análises de sensibilidade. Na primeira, os resultados encontrados baseados no PRG são comparados em ambientes de reparo perfeito e reparo mínimo. Já na segunda, é analisado como o coeficiente de aversão ao risco do hospital interfere no processo de tomada de decisão tomadas pelos jogadores.

4.1 Estratégia ótima do hospital

Para o par (P, C_s) proposto pelo fabricante, o hospital analisará as suas três possíveis utilidades esperadas, representadas pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3, e escolherá a alternativa que lhe garantirá o maior *payoff* esperado. O plano $P - C_s$ visualizado Figura 2.10, proposta no trabalho de Murthy & Asgharizadeh (1998), permeia o campo decisório da instituição de saúde.

Enfatiza-se que tal plano é diretamente relacionado com a disposição máxima de pagamento do hospital para as opções de manutenção oferecidas pelo fabricante. Logo, os preços de reserva para as opções de manutenção $(\bar{P} \text{ e } \bar{C}_s)$ correspondem aos limites máximos de compra da instituição de saúde, se tais limites são ultrapassados o hospital não compra o equipamento (A_0) .

4.2 Estratégia ótima do fabricante

A estratégia ótima do fabricante, denotada por P^* e C_s^* , representa a combinação de preços que maximize seu lucro esperado e, por consequência, influencia a decisão do hospital. Para a otimização do seu *payoff* é necessário determinar os preços de reserva do hospital $(\bar{P} \text{ e } \bar{C}_s)$. O cálculo de tais preços é idêntico ao apresentado por Murthy & Asgharizadeh (1998).

$\bar{P}$ é obtido ao igualar a Equação 3.2, a utilidade esperada do hospital associada a opção A_1 a zero. Posteriormente, isola-se a variável de interesse e o seu valor é determinado. A Equação 4.1 descreve o cálculo de $\bar{P}$.

$$\bar{P} = RL - C_b - \frac{\ln(\varphi)}{\gamma} \quad (4.1)$$

O $\bar{C}_s$ é obtido ao igualar a Equação 3.3, a utilidade esperada do hospital associada a opção A_2 a zero. Entretanto, dada a impossibilidade do isolamento de $\bar{C}_s$, Equação 4.2, utilizou-se um método de cálculo numérico, o método da bisseção¹¹, no provimento de seu valor aproximado.

$$\ln E[e^{\gamma \bar{C}_s N(L)}] = \gamma * (RL - C_b) \quad (4.2)$$

Com a determinação dos preços de reserva do hospital para as opções de manutenção, o fabricante escolherá a estrutura de preços que maximiza o seu lucro esperado. Como o problema proposto é de informação completa e perfeita, o fabricante sempre colocará o preço da opção que lhe convém como a disposição máxima de pagamento do hospital, enquanto para a opção não desejada, o seu preço será superior à disposição de pagamento do cliente. Desta forma, o excedente do consumidor sempre será nulo, mesma situação de Murthy & Asgharzadeh (1998).

4.3 Cálculo do tempo excedente de reparo

O cálculo do tempo excedente de reparo, isto é, o tempo em que o fabricante incorre em penalidade é fundamental para saber o valor de $\bar{P}$ e $E(\delta(P, C_s, q, A_1))$.

No modelo proposto, uma das hipóteses corresponde que os tempos de reparo são distribuídos exponencialmente. Sendo assim, a fim de saber o tempo esperado que o fabricante incorre em penalidade são utilizadas algumas técnicas de simulação. Primeiro, são gerados números aleatórios exponencialmente distribuídos e os compara com o tempo τ estabelecido. Se tal diferença for positiva; então guarda-se o valor, caso contrário, é descartado.

Em seguida, repete-se o processo descrito até a última falha esperada. Posteriormente, guarda-se o somatório dos tempos excedentes, ou seja, cria-se um vetor desse tempo acumulado. Ao fim dessa etapa, são realizadas simulações para se obter um valor médio do tempo excedido. O fluxograma da Figura 4.1 mostra como o processo é feito.

¹¹ O Método da Bisseção pode ser visto em Hillier e Lieberman (2009).

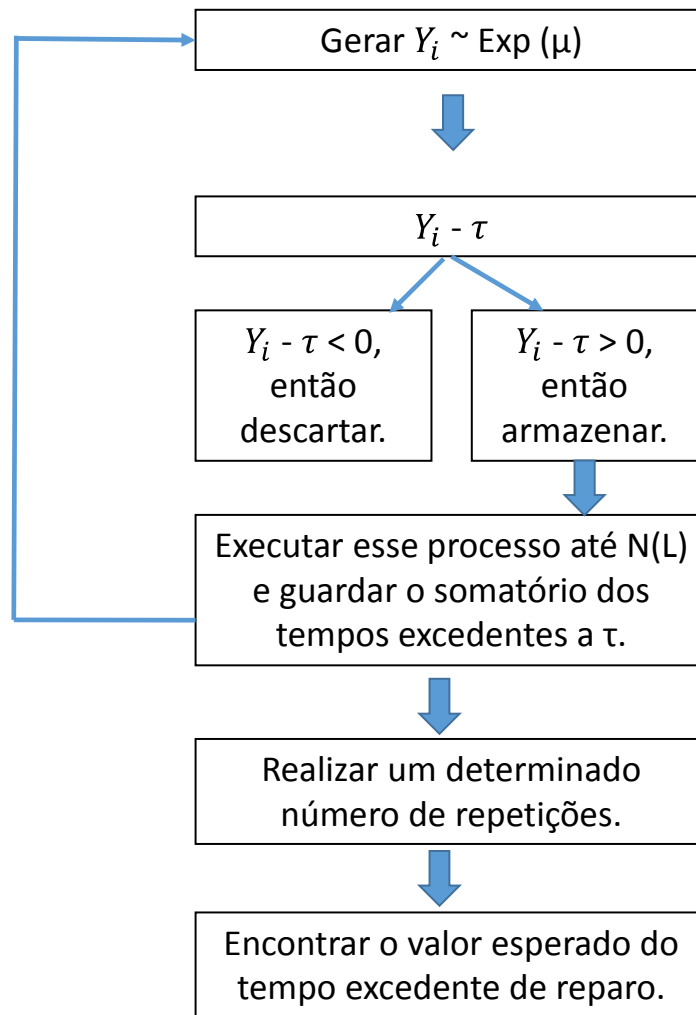


Figura 4.1- Fluxograma para o Cálculo do Tempo de Reparo Excedente
Fonte: Esta pesquisa (2016)

4.4 Exemplo numérico

Para a execução do exemplo numérico foram utilizados 38 dados referentes aos tempos entre falhas e tempos de manutenção de um Angiógrafo. Então, realizaram-se as etapas descritas na Seção 2.3.2.1, a fim de encontrar os parâmetros da distribuição Weibull (α , β), o parâmetro de rejuvenescimento (q) e $N(L)$.

A fim de ratificar a estimação referente aos tempos de falha acumulados, realizou-se uma análise gráfica para confrontar os resultados simulados com os valores reais. A Figura 4.2 expõe tal comparação. Conclui-se que a simulação representou bem o ajustamento proposto.

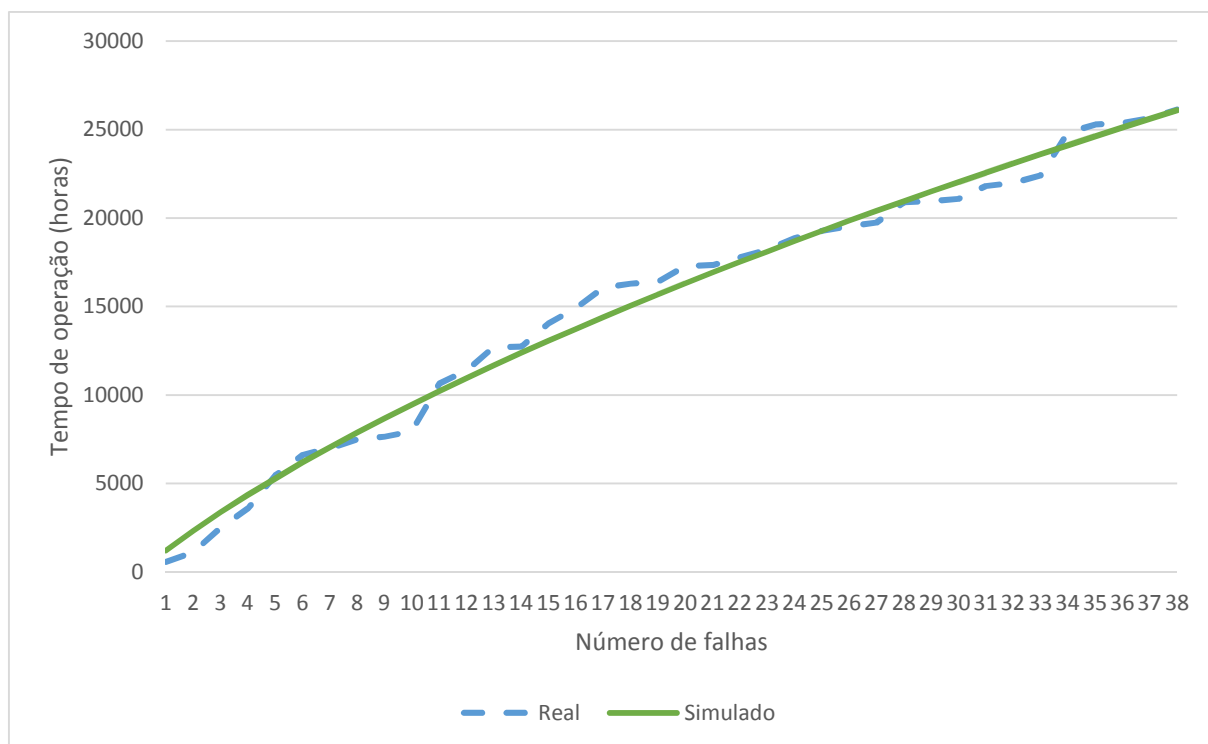


Figura 4.2 - Comparação entre os tempos de falha acumulados simulados e reais
Fonte: Esta pesquisa (2016).

Os resultados encontrados na simulação foram os seguintes: $\alpha = 1351,8$; $\beta = 1,658$; $q = 0,097$ e $N(L) = 9$ falhas. Ressalta-se que pelo fato do β ficar entre 1 e 2 significa que a taxa de falha do equipamento é crescente e côncava (EBELING, 2004). Em relação ao parâmetro de rejuvenescimento, o fato desse estar muito próximo a zero implica que o tipo de reparo associado é muito próximo ao reparo perfeito, logo o serviço de manutenção que o Angiógrafo recebe apresenta uma ótima qualidade.

Os demais parâmetros para a execução do modelo e composição das estratégias ótimas dos jogadores podem ser vistos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Parâmetros do Exemplo Numérico

Preço de venda do Angiógrafo (C_b)	R\$ 1.476 (10^3)
Receita por unidade de tempo do Angiógrafo (R)	R\$ 0.185 (10^3) h^{-1}
Custo da execução da manutenção incorrido pelo fabricante (C_r)	R\$ 8 (10^3)
Média do tempo de serviço da manutenção (μ)	0,3779 h^{-1}
Custo da penalidade (θ)	R\$ 3,5 (10^3) h^{-1}
Grau de aversão ao risco do hospital (γ)	0,1
Período do jogo (L)	1 ano = 8760 horas
Tempo máximo para a conclusão da manutenção (τ)	2 horas

Fonte: Esta pesquisa (2016).

O resultado da simulação referente ao tempo excedente em que o fabricante incorre em penalidade é aproximadamente a 11 horas e a compensação financeira revertida ao hospital corresponde a R\$ 38,5 (10^3). Sendo assim, com base nas informações da Tabela 4.1, $\bar{P} = \text{R\$ } 167,09 (10^3)$, enquanto que $\bar{C}_s = \text{R\$ } 10,55(10^3)$. Ressalta-se que no ambiente hospitalar o preço da garantia estendida para um equipamento clínico é normalmente comercializado num montante que fica entre 5% a 12% do preço original de compra do dispositivo médico (SMITHSON; DICKEY, 2004).

O plano $P - C_s$ da Figura 4.3 mostra como os preços de reserva do hospital estão relacionados ao longo das regiões de tomada de decisão.

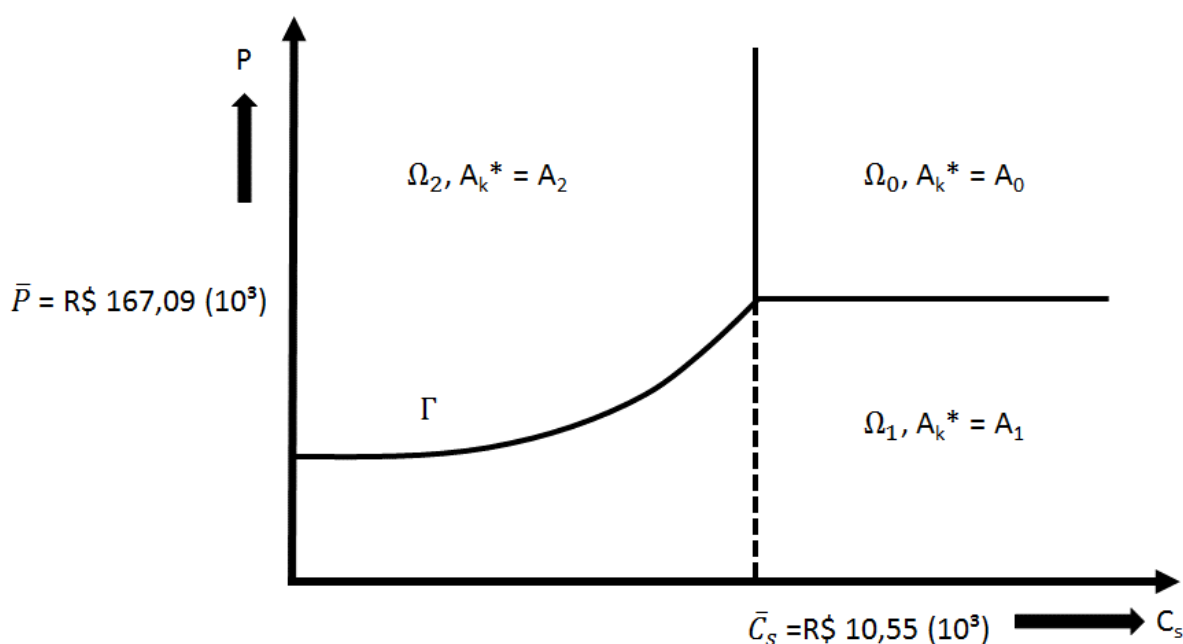


Figura 4.3 - Plano $P - C_s$ do Hospital
Fonte: Esta pesquisa (2016)

Com base nos valores obtidos de $\bar{P}$ e $\bar{C}_s$, a estratégia dominante adotada pelo fabricante é a seguinte: $P^* = \bar{P}$ e $C_s^* > \bar{C}_s$. Para essa estrutura de preços, o hospital analisa suas utilidades esperadas e escolhe a opção A_1 , uma vez que as outras opções não garantem um resultado melhor. Neste caso, o equilíbrio de Nash é a instituição de saúde escolhendo comprar o equipamento hospitalar com a adesão da garantia estendida (A_1). Quanto ao lucro esperado do fabricante, o montante corresponde a R\$ 1.532,46 (10^3) e a utilidade esperada do hospital é zero, não existe excedente do consumidor. Finalmente, para a presente estrutura de preços, o hospital não tem incentivo a mudar de opção de manutenção.

4.4.1 Extensões do trabalho

4.4.1.1 Comparação das estratégias dos jogadores nos cenários de reparo perfeito e reparo mínimo

Uma vez já desenvolvidos os resultados para o reparo imperfeito, foram analisados cenários para os reparos perfeito e mínimo no intuito de saber as estratégias dos jogadores, bem como, o equilíbrio de Nash do jogo proposto. Na situação do reparo perfeito, as estratégias dos jogadores e o equilíbrio de Nash são os mesmos que nos casos de reparo imperfeito, ou seja, o fabricante propõe a estrutura de preços que estimule o hospital a escolher a opção A_1 .

Os resultados da simulação indicaram os seguintes resultados: $N(L) = 7$ e o tempo excedente esperado que o fabricante incorre em penalidade corresponde a 9 horas. Baseado nisso, os preços de reserva do hospital são: $\bar{P} = R\$ 161,89 (10^3)$ e $\bar{C}_s = R\$ 14,78 (10^3)$, enquanto que o lucro esperado do fabricante é $R\$ 1.551,90 (10^3)$. A Tabela 4.2 compara os resultados do reparo imperfeito e do reparo perfeito, enfatizando a variação dos resultados.

Tabela 4.2- Comparação dos Resultados entre o Reparo Imperfeito e o Reparo Perfeito

	Reparo Imperfeito	Reparo Perfeito	Variação %
$N(L)$	9	7	- 22,22%
$\bar{P}$	R\$ 167,09 (10^3)	R\$ 161,89 (10^3)	+ 3,21%
$\bar{C}_s$	R\$ 10,55 (10^3)	R\$ 14,78 (10^3)	-28,59%
$E(\delta(P, C_s, q, A_1))$	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.551,90 (10^3)	-1,25%
$E(\delta(P, C_s, q, A_2))$	R\$ 1.499,45 (10^3)	R\$ 1.523 (10^3)	-1,63%
A_k^*	A_1	A_1	-----
Lucro do Fabricante	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.551,90 (10^3)	-1,25%

Fonte: Esta pesquisa (2016).

Comparando os resultados encontrados, observa-se que as variações no lucro do fabricante para os casos de reparos perfeito e imperfeito são percentualmente pequenas, entretanto, quantitativamente os valores são bastante expressivos, uma vez que estão na ordem de 10^3 . Sendo assim, mudanças nos processos estocásticos que regem o comportamento da falha e reparo do sistema afetam consideravelmente o valor monetário do *payoff* do fabricante.

Para o cenário do reparo mínimo, os resultados da simulação foram: $N(L) = 22$ e o tempo excedente esperado que o fabricante incorre em penalidade corresponde a 27 horas. Quanto aos preços de reserva do hospital, esses foram: $\bar{P} = R\$ 200,48 (10^3)$ e $\bar{C}_s = R\$ 5,16 (10^3)$. Baseado nisso, estratégia dominante a ser adotada pelo fabricante é a seguinte: $P^* > \bar{P}$ e $C_s^* = \bar{C}_s$. A

partir dela, o hospital a escolhe a opção A_2 , ou seja, o serviço sob demanda, implicando na ocorrência de um novo equilíbrio de Nash e o lucro esperado do fabricante é R\$ 1.413,98 (10^3).

Portanto, quando a premissa de reparo mínimo for adotada para caracterizar o estado do sistema após as ações de manutenção, menos o fabricante está disposto com que o hospital tenha um vínculo, ou seja, adote a garantia estendida, pois estará mais propenso a incorrer em mais multas. Finalmente, a Tabela 4.3 compara os resultados entre os reparos imperfeito e mínimo.

Tabela 4.3- Comparação dos Resultados entre os Reparos Imperfeito e Mínimo

	Reparo Imperfeito	Reparo Mínimo	Variação %
N(L)	9	22	+144,44%
$\bar{P}$	R\$ 167,09 (10^3)	R\$ 200,48 (10^3)	+ 19,98%
$\bar{C}_s$	R\$ 10,55 (10^3)	R\$ 5,16 (10^3)	-51,11%
$E(\delta(P, C_s, q, A_1))$	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.405,02 (10^3)	-9%
$E(\delta(P, C_s, q, A_2))$	R\$ 1.499,45 (10^3)	R\$ 1.413,98 (10^3)	-5,70%
A_k^*	A_1	A_2	-----
Lucro do Fabricante	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.413,98 (10^3)	-7,73%

Fonte: Esta pesquisa (2016).

Novamente, ao confrontar os resultados da tabela 4.3 entre os reparos imperfeito e mínimo, nota-se que as variações percentuais do lucro do fabricante são pequenas, entretanto, quantitativamente o valor é expressivo, uma vez que está na ordem de 10^3 . A junção dos resultados para os 3 tipos de reparo pode ser vista por meio da Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Comparação das Estratégias entre os Reparos Perfeito, Imperfeito e Mínimo

	Reparo Perfeito	Reparo Imperfeito	Reparo Mínimo
N(L)	7	9	22
$\bar{P}$	R\$ 161,89 (10^3)	R\$ 167,09 (10^3)	R\$ 200,48 (10^3)
$\bar{C}_s$	R\$ 14,78 (10^3)	R\$ 10,55 (10^3)	R\$ 5,16 (10^3)
$E(\delta(P, C_s, q, A_1))$	R\$ 1.551,90 (10^3)	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.405,02 (10^3)
$E(\delta(P, C_s, q, A_2))$	R\$ 1.523 (10^3)	R\$ 1.499,45 (10^3)	R\$ 1.413,98 (10^3)
A_k^*	A_1	A_1	A_2
Lucro do Fabricante	R\$ 1.551,90 (10^3)	R\$ 1.532,46 (10^3)	R\$ 1.413,98 (10^3)

Fonte: Esta pesquisa (2016).

Ao observar as três situações de reparo, os resultados, como um todo, se comportam dentro do que a literatura de confiabilidade apresenta. No que tange ao valor de $N(L)$, sob a hipótese do reparo perfeito, o equipamento apresenta uma quantidade inferior de intercorrências

do que num ambiente de reparo mínimo. Enquanto que o reparo imperfeito é uma condição intermediária entre tais extremos. Logo, foi ratificado que o reparo perfeito subdimensiona a quantidade de falhas, enquanto o reparo mínimo superdimensiona o número de intercorrências.

Ademias, outros dois pontos a serem mencionados com a variação do processo estocástico de falha-reparo do equipamento são os preços de reserva do hospital ($\bar{P}$, $\bar{C}_s$) e o lucro do fabricante. Os preços de reserva do hospital apresentam um comportamento antagônico conforme se altera o processo estocástico de falha e reparo do equipamento. $\bar{P}$ aumentou 24% ao se deslocar do reparo perfeito ao mínimo, enquanto que, $\bar{C}_s$ caiu 65% ao se deslocar do reparo perfeito ao mínimo. Desta forma, o preço de reserva para a opção serviço sob demanda da instituição de saúde é bastante sensível as alterações dos processos estocásticos associados aos tipos de reparo.

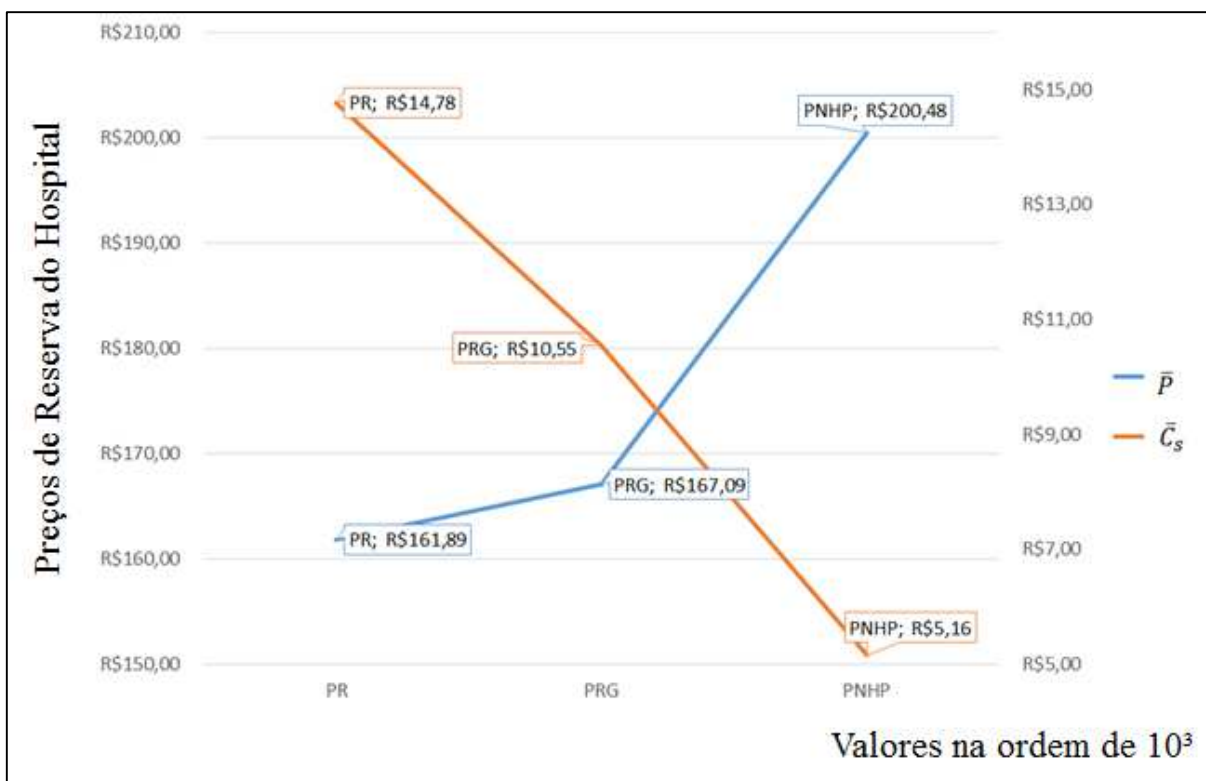


Figura 4.4- Relação entre os Preços de Reserva do Hospital e os Processos Estocásticos

Fonte: Esta pesquisa (2016)

Quanto ao lucro do fabricante, esse diminui conforme aumenta o número esperado de falhas, em função da alteração do processo estocástico de falha e reparo do equipamento. A variação do seu *payoff* entre os casos de reparos perfeito e mínimo corresponde a

aproximadamente 10%. A Figura 4.5 mostra a trajetória do lucro fabricante sujeito às alterações dos processos estocásticos envolvidos.

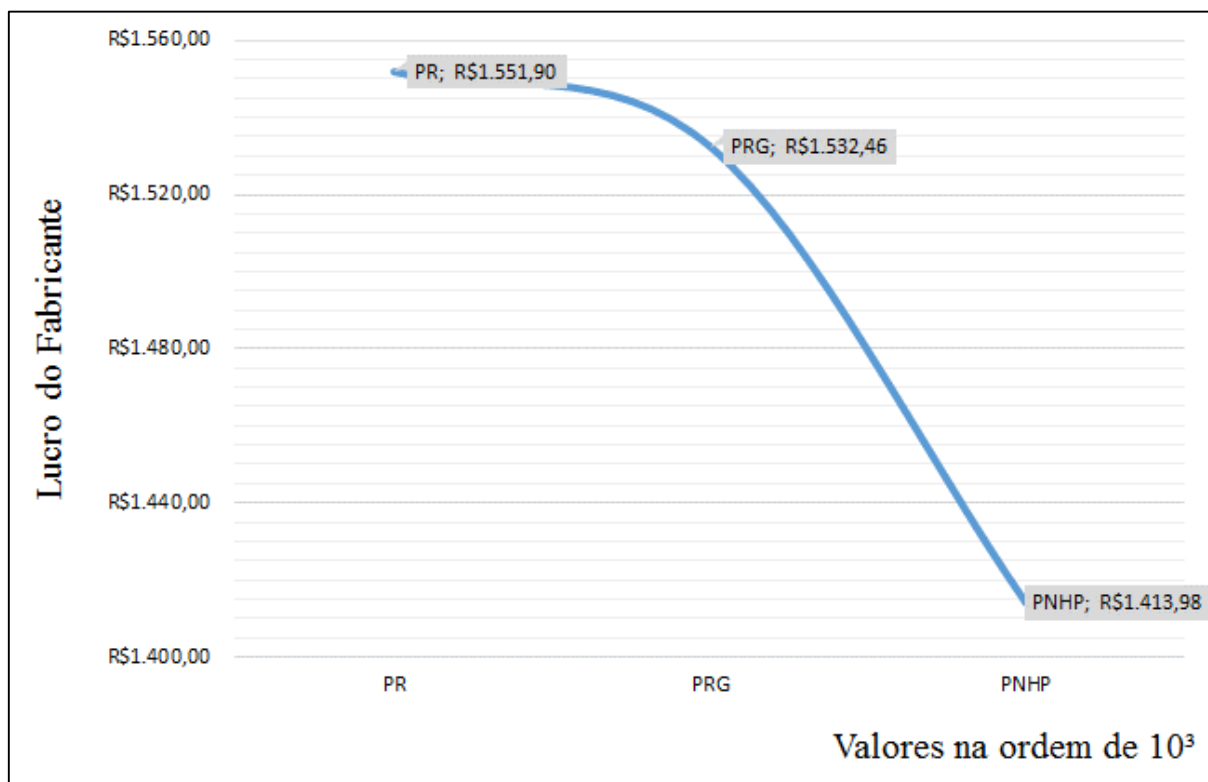


Figura 4.5- Relação entre o Lucro do Fabricante e os Processos Estocásticos
Fonte: Esta pesquisa (2016)

Por fim, o fato do lucro fabricante decair conforme aumenta-se o número esperado de falhas é também evidenciado por Murthy & Asgharizadeh (1998).

4.4.1.2 Comparação das estratégias dos jogadores com variações no parâmetro de aversão ao risco

Esta análise de sensibilidade relaciona o parâmetro de aversão ao risco do hospital e as estratégias dos jogadores envolvidos. Sendo assim, na presente análise, o γ variou no intervalo compreendido entre 0,001 e 4. Conforme tal parâmetro cresce, menores são os preços de reserva do hospital (Figuras 4.6 e 4.7) e, por consequência, como a instituição de saúde quer pagar menos, o lucro do fabricante também diminuía, entretanto, a variabilidade do *payoff* do fabricante suavizada a partir de $\gamma = 0,5$. A Figura 4.8 mostra a trajetória do lucro do fabricante em função do parâmetro de aversão ao risco.

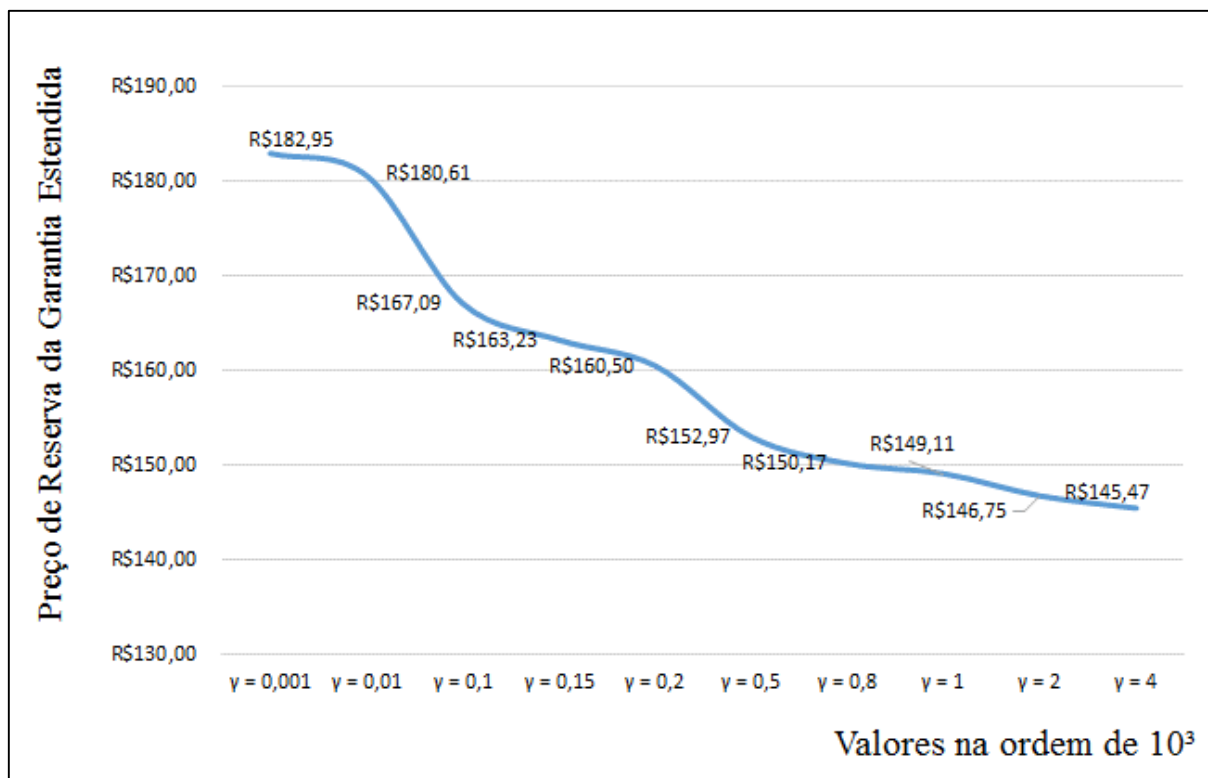


Figura 4.6- Relação entre o Preço de Reserva do Hospital para a Garantia Estendida e o Coeficiente de Aversão ao Risco

Fonte: Esta pesquisa (2016)

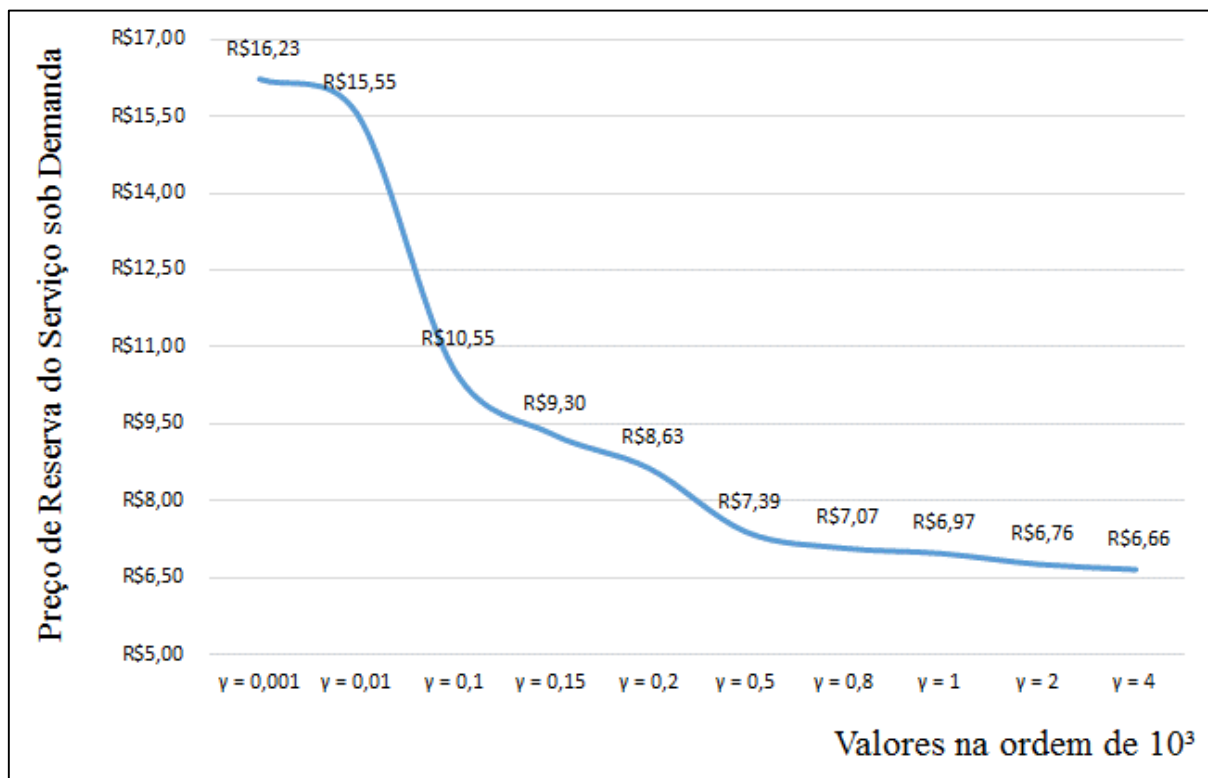
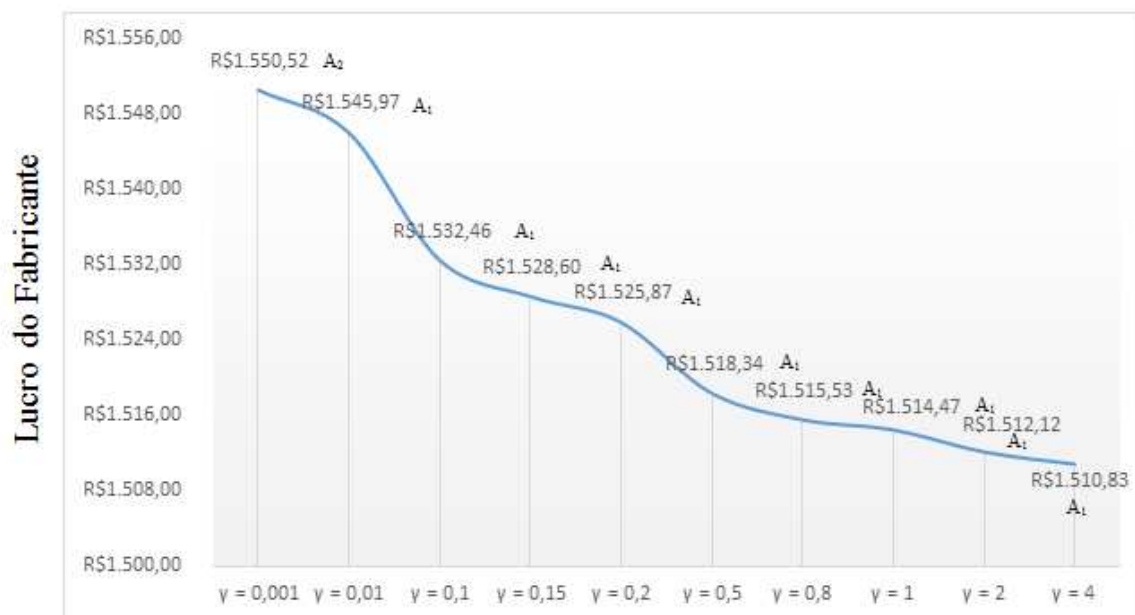


Figura 4.7- Relação entre o Preço de Reserva do Hospital para o Serviço sob Demanda e o Coeficiente de Aversão ao Risco

Fonte: Esta pesquisa (2016)



Valores na ordem de 10^3

Figura 4.8- Relação entre o Lucro do Fabricante e o Parâmetro de Aversão ao Risco

Fonte: Esta pesquisa (2016)

Outro ponto a ser destacado é que com o aumento de γ a instituição de saúde está disposta a adotar a opção de garantia estendida. Apenas quando o $\gamma = 0,001$ o hospital adota a opção serviço sob demanda.

A trajetória dos resultados encontrados nessa análise de sensibilidade em relação à variação do parâmetro de aversão ao risco também é similar ao trabalho publicado por Murthy & Asgharizadeh (1998). Sendo assim, uma elevação no γ diminui tanto os preços de reserva do cliente, como também, o lucro do fabricante.

5 CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho consistiu em juntar duas metodologias já consolidadas na literatura: uma derivada da economia industrial, em especial, da concorrência oligopolista, o jogo de Stackelberg, e a outra derivada da teoria da confiabilidade aplicada a sistemas reparáveis, o Processo de Renovação Generalizado. Com a junção de ambas se estudou quantitativamente o problema de contratos de manutenção de equipamentos hospitalares, tema bastante presente no cotidiano das instituições e centros de saúde.

A princípio pode-se pensar que tais teorias não têm ligação, uma vez que essas são empregadas em diferentes campos de estudo. Entretanto, o presente trabalho as agregou sistematicamente. Primeiramente, utilizou-se o *framework* do jogo de Stackelberg para moldar a dinâmica do problema, o tipo de interação entre os jogadores (líder e seguidor), as decisões a serem executadas e os *payoffs* gerados dos entes envolvidos. Posteriormente, a empregabilidade do PRG é justificada para moldar o processo estocástico de falha e reparo do equipamento hospitalar, relacionado com o parâmetro de rejuvenescimento.

A fim facilitar a compreensão do leitor sobre o que se está sendo proposto, no Capítulo 2 foram mostrados alguns conceitos básicos necessários para a compreensão do que é discutido nesta dissertação. Inicialmente foram apresentados os elementos, a aplicabilidade, a relevância e os tipos de jogos que existem na literatura, enfatizando os jogos não cooperativos, em especial, o jogo de Stackelberg. Posteriormente, foram expostos alguns componentes bastante empregados na teoria microeconômica, tais como: a função utilidade, risco e os excedentes do consumidor e produtor. Ademais, foram explicados os conceitos relacionados a processos estocásticos, bem como, o método de estimação do PRG proposto por Yañez, Joglar & Modarres (2002). Em seguida, explicou-se a caracterização do ambiente de contratos de manutenção, enfatizando o setor hospitalar e um exemplo quantitativo de um modelo de contrato de manutenção.

Em relação ao desenvolvimento do modelo, aplicado na interação entre um fabricante do equipamento hospitalar e seu possível cliente, o hospital, esse tópico foi discutido no Capítulo 3 da dissertação. Sendo assim, foram apresentadas as motivações dos jogadores, a relação de poder entre os envolvidos, as possíveis ações de cada jogador, bem como, os seus respectivos *payoffs*. Além disso, foram expostas as hipóteses que circundam o modelo e a sua estrutura de solução: a adaptação do problema de pesquisa num jogo líder e seguidor do tipo de Stackelberg.

No Capítulo 4 foi explicado o procedimento para a obtenção das estratégias ótimas a serem tomadas pelos jogadores envolvidos, baseado nos preços de reserva do hospital. Nesta seção, também se realizou um exemplo numérico com dados de um Angiógrafo e também relaxou a hipótese do reparo imperfeito, incorporando os reparos perfeito e mínimo. Os valores encontrados mostram um mesmo direcionamento estratégico quando se analisa o reparo perfeito com o imperfeito, uma vez que o parâmetro de rejuvenescimento é próximo de zero. Já ao se analisar o reparo imperfeito com o reparo mínimo o direcionamento estratégico é oposto. Outra análise de sensibilidade foi feita, dessa vez enfatizando o papel do parâmetro de aversão ao risco. A partir do momento que o γ aumenta, menor é o lucro do fabricante. Finalmente, é constatado que conforme se muda do reparo perfeito para o reparo mínimo o *payoff* do fabricante cai em função da diminuição do preço de reserva do hospital.

5.1 Modelo para a manutenção de equipamentos hospitalares

O método proposto contribui para fomentar a discussão sobre a manutenção de equipamentos hospitalares realizadas pelo fabricante do equipamento. Além disso, enfatiza-se qual deve ser a escolha ideal dos jogadores para os diversos cenários, tais como: o tipo de reparo que o dispositivo recebe (perfeito, mínimo ou imperfeito) e as diferentes percepções de risco do hospital.

A utilização do arcabouço teórico do Jogo de Stackelberg é empregada uma vez que a relação entre jogadores não é homogênea, isto é, um jogador tem mais vantagem do que o outro. Neste trabalho, o fabricante do equipamento tem prerrogativa em relação ao hospital, visto que ele detém o *know how* da manutenção do dispositivo médico e a instituição de saúde necessita do item para um melhor provisionamento de seu serviço.

Quanto ao PRG, a sua aplicação no modelo é justificada pelo fato de passar mais realismo e credibilidade ao processo de falha reparo acometido ao equipamento hospitalar, dado o seu caráter flexível em tratar os diferentes tipos de reparo. Tal medida foi empregada para tornar o presente estudo aplicável ao ambiente médico, pois os dispositivos hospitalares são caracterizados pela inerente complexidade e as hipóteses de reparo perfeito e mínimo não são factíveis nesses contextos. Ademais, uma das maiores contribuições do PRG é permitir quantificar a eficácia do reparo feito pela equipe de manutenção, abrindo um campo de aplicações voltadas para a gestão e controle de processos produtivos (ROCHA, 2006). O exemplo numérico, com os dados de um Angiógrafo, ilustra como é feita a iteração entre os jogadores, no sentido de saber o equilíbrio do jogo proposto.

As limitações desse trabalho de pesquisa estão relacionadas a apenas ações corretivas num equipamento hospitalar, bem como, o modelo supor a hipótese de informação completa. Ademais, não se considerou outras formas de penalidade específicas a ambientes hospitalares.

5.2 Sugestão de trabalhos futuros

O presente trabalho pode ser expandido de várias formas, seja relacionado a aspectos de confiabilidade do sistema, como também, a aspectos de teoria dos jogos, ratificando o vasto campo possibilidades que o tema de garantia estendida de equipamentos hospitalares pode oferecer aos pesquisadores.

Sendo assim, essa dissertação pode ser ampliada da seguinte forma:

- Aumentar a quantidade de clientes a serem atendidos pelo fabricante, esse fato pode implicar na ocorrência de fila. Logo, o número ótimo de clientes a serem atendidos tornar-se-á uma variável a ser otimizada;
- De modo análogo, com a existência de uma possível fila, outra variável que poderá ser incorporada no modelo e, por consequência, também otimizada pelo fabricante é o número de canais de serviço (equipes de manutenção);
- Ao considerar a existência de fila poder-se pensar em mudar a sua disciplina, isto é, alguns clientes teriam prioridade no atendimento em relação a outros (população heterogênea). Desse modo, com a consideração da fila com prioridade abrem-se duas possibilidades de análise: fila do tipo preemptivo e não-preemptivo;
- Incorporar a assimetria de informação do modelo, seja pelo fato do hospital não saber a taxa de falha do equipamento ou o fabricante não saber o perfil do seu possível cliente, o grau de aversão ao risco;
- Utilizar uma outra abordagem para estruturar e solucionar o presente problema de pesquisa. Por exemplo, utilizar uma adaptação do jogo oligopolista de Cournot como instrumento para modelar o ambiente de contratos de manutenção para equipamentos hospitalares. Nesse jogo, as empresas apresentam o mesmo nível de poder e determinam suas decisões simultaneamente, considerando a ação ótima do concorrente (GIBBONS, 1992);
- Considerar um jogo cooperativo e decidir os *payoffs* dos jogadores com base no Shapley, como visto por Hamidi, Liao & Szidarovszky (2014);

- Considerar o Kijima tipo 2 na estrutura falha e reparo do equipamento no intuito de saber o equilíbrio do jogo;
- Propor um jogo de Stackelberg contínuo, considerando um horizonte de tempo superior a um ano. Sendo assim, num ambiente em que o equipamento é acometido pelo reparo imperfeito (o tempo entre falhas encurtar-se-ia ao longo tempo), quais seriam as estratégias dos jogadores? Como seria a estrutura da garantia?;
- Inversão dos papéis, isto é, o modelo foi proposto tendo como líder o fabricante e o seguidor como o hospital. Sendo assim, como seria a dinâmica do problema se a estrutura de poder fosse invertida?;
- Utilizar outros tipos de penalidades, como exemplo, a disponibilidade mínima requerida do equipamento;
- Uma vez que equipamentos hospitalares são caros é interessante considerar a manutenção preventiva no modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASGHARIZADEH, E; MURTHY, D.N.P. “Service Contracts: A Stochastic Model”. **Mathematical and Computer Modelling**, 31 (10–12): 11–20, 2000.
- AZEVEDO, R.V. Um problema de decisão simultânea da política de substituição e da quantidade de sobressalentes para sistemas sujeitos a reparos imperfeitos utilizando algoritmos genéticos multiobjetivos e simulação discreta de eventos. Recife, 2013. 128 p. (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) / UFPE).
- BLISCHKE, W.R; MURTHY, D.N.P. **Warranty Cost Analysis**. New York, Marcel Dekker, 1994, 744p.
- BLISCHKE, W.R; MURTHY, D.N.P. **Product Warranty Handbook**, New York, Marcel Dekker, 1996, 952p.
- BLUMBERG, D.F. New Strategic Directions in Acquiring and Outsourcing High-Tech Services by Hospitals and Implications for Clinical Engineering Organizations and ISOs. In: DYRO, J. (Org.). **The Clinical Engineering Handbook**. New York: Elsevier, 2004.p. 137–146.
- BROWN, M; PROSCHAN, F. “Imperfect Repair”. **Journal of Applied Probability**, 20 (4): 851–859, 1983.
- CALIL, S.J; TEIXEIRA, M.S. Gerenciamento de Manutenção em Equipamentos Hospitalares. In: CALIL, S.J (Org.). **Equipamentos Médico-Hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção**. Brasília: Ministério da Saúde (Secretaria de Gestão de Investimentos em Saúde), 2002.p. 12–106. Disponível em: <
http://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/equipamentos_gerenciamento1.pdf >. Acessado em: 08/12/2015.
- CRUZ, A.M; RINCON A.M.R. “Medical device maintenance outsourcing: Have operation management research and management theories forgotten the medical engineering community? A mapping review”. **European Journal of Operational Research**, 221 (1): 186–197, 2012.
- DIMITRAKOS, T.D; KYRIAKIDIS. “An improved algorithm for the computation of the optimal repair/replacement policy under general repairs”. **European Journal of Operational Research**, 182 (2): 775–782 (2007).
- EBELING, C.E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. Boston, McGraw–Hill Companies, 2004, 486p.

- EN 13306: 2001. European Standard. In: CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION), Brussels, 2001. Maintenance Terminology.
- ESMAEILI, M; GAMCHI, N.S; ASGHARIZADEH, E. “Three –level warranty service contract among manufacturer, agent and customer: A game-theoretical approach”. **European Journal of Operation Research**, 239 (1): 177–186, 2014.
- FERREIRA, R; MOURA, M.J.C; FIRMINO, P.R.A; DROGUETT, E.L; BRAGA, E. Desenvolvimento de um teste de hipótese para um modelo híbrido de Riscos Competitivos dependentes e Processos de Renovação Generalizados. In: XLII–SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, Bento Gonsalves, 2010.
- FIANI, R. **Teoria dos Jogos**.3.ed. Rio de Janeiro, Elsevier Brasil, 2009, 400p.
- FRAGA, L.G; PINTO, E.R. O Processo de Weibull Poisson para a Modelagem da Confiabilidade em Sistemas Reparáveis. In: Anais do XII Encontro Mineiro de Estatística, Uberlândia, 2013. Disponível em: <
<http://www.seer.ufu.br/index.php/matematicaeestatisticaemfoco/article/download/24152/13354>>.
Acessado em: 08/12/2015
- FOGLIATO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro, Elsevier, 2009, 267p.
- GIBBONS, R. **A primer in Game Theory**. New Jersey, Prentice Hall, 1992, 288p.
- GREVE, T.F. **Non–Cooperative Game Theory**. Tokyo, Springer Japan, 2015, 263p.
- GUEDES, B.N; MOURA, M.J.C; LINS, I.D; ZAIDAN, H.P.S; DROGUETT, E.L; PASCUAL, R. Negotiation of extended warranties for medical equipment. In: ESREL 25th, Zurich, 2015.p. 975–982.
- GUO, R; ASCHER, H; LOVE, E. “Toward Practical and Synthetical Modelling of Repairable Systems”. **Economic Quality Control**, 16 (2): 147–182, 2001.
- HILLIER, F.S; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to Operations Research**. 9.ed. New York, McGraw Hill, 2009, 1088p.
- HUSNIAH, H; PASARIBU, U.S; ISKANDAR, B.P. “Service Contract Management with Availability Improvement and Cost Reduction”. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, 10 (1): 146 – 151, 2015. Disponível em: <
http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2015/jeas_0115_1433.pdf> . Acessado em: 01/04/2016

- JACKSON, C; PASCUAL, R. "Optimal maintenance service contract negotiation with aging equipment". **European Journal of Operation Research**, 189 (2): 387–398, 2008.
- JACKSON, C; PASCUAL, R. **Optimal negotiation of maintenance contracts under several failure processes**. Disponível em: <<http://web.ing.puc.cl/~rpascual/mispapers/jackson07b.pdf>>. Acessado em: 11 de janeiro de 2015.
- JACOPINO, A.G. Generalization and bayesian solution of the general renewal process for modeling the reliability effects of imperfect inspection and maintenance based on imprecise data. Maryland, 2005. 215p. (PhD. (thesis) – Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, Maryland).
- JIANG, R; MURTHY, D.N.P. "A study of Weibull shaper parameter: Properties and significance". **Reliability Engineering & System Safety**, 96 (12): 1619–1626, 2011.
- KIJIMA, M. "Some Results for Repairable Systems with General Repair". **Journal of Applied Probability**, 26 (1): 89–102.
- KIJIMA, M; SUMITA, M. "A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative markovian increments". **Journal of Applied Probability**, 23 (1): 71–88, 1986.
- KIM, S.H; COHEN, M.A; NETESSINE, S; VEERARAGHAVAN, S. "Contracting for Infrequent Restoration and Recovery of Mission-Critical Systems". **Management Science**, 56 (9): 1551-1567, 2010.
- KREPS, D.M; WILSON, R. "Sequential Equilibria". **Econometrica**, 50 (4): 863–894, 1982.
- MANZINI, R; REGATTIERI, A; PHAM, H; FERRARI, E. **Maintenance for Industrial Systems**. London, Springer London, 2010, 490p.
- MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C; HUBELE, N.F. **Engineering Statistics**. 5.ed. New Jersey, Wiley, 2011, 546p.
- MORRIS, P. **Introduction to Game Theory**. New York, Springer New York, 1994, 252p.
- MOURA, M.C.; ROCHA, S.P.V; DROGUETT, E.L; JACINTO, C.M. "Avaliação Bayesiana da Eficácia da Manutenção via Processo de Renovação Generalizado". **Pesquisa Operacional**, 27 (3): 569–589, 2007.
- MURTHY, D.N.P. Maintenance Service Contracts. In: DAYA, M.B; DUFFUAA, S.O; RAOUF, A. (Org.). **Maintenance, Modeling and Optimization**. New York, Springer New York, 2000.p. 111–132.

- MURTHY, D.N.P; ASGHARIZADEH, E. “A stochastic model for service contract”. **International Journal of Reliability**, 5 (1): 29–45, 1998.
- MURTHY, D.N.P; JACK, N. **Extended Warranties, Maintenance Service and Lease Contracts: Modeling and Analysis for Decision-Making**. London, Springer London, 2014, 399p.
- MURTHY, D.N.P; JACK, N; KUMAR, U. Maintenance Outsourcing: Issues and Challenges. In: DOHI, T; NAKAGAWA, T. (Org.). **Stochastic Reliability and Maintenance Modeling**. London: Springer London, 2013.p.41–62.
- MURTHY, D.N.P; KARIM, M; AHMADI, A. “Data management in maintenance outsourcing”. **Reliability Engineering & System Safety**, 142: 100–110, 2015.
- MURTHY, D.N.P; YEUNG, V.” Modelling and Analysis of Maintenance Service Contracts”. **Mathematical and Computer Modelling**, 22 (10–12): 219–225, 1995.
- NAKAGAWA, T; KAZUMI, Y. “Optimum Policies for a System with Imperfect Maintenance”. **Reliability, IEEE Transactions**, 36 (5): 631–633, 1987.
- NASH, J.F. Non-Cooperative Games. New Jersey, 1950. 32p. (PhD. (thesis) – Department of Mathematics/ Princeton University). Disponível em: <<http://rbcs.princeton.edu/sites/default/files/Non-Cooperative Games Nash.pdf>>. Acessado em 07/12/2015.
- NELSON, R. **Probability, Stochastic Processes and Queueing Theory: The Mathematics of Computer Performance Modeling**. 1.ed. New York, Springer New York, 1995, 583p.
- OSBORNE, M.J; RUBINSTEIN, A. **A Course in Game Theory**. Cambridge, MIT Press, 1994, 352p.
- PHAM, H; WANG, H. “Imperfect Maintenance”. **European Journal of Operational Research**, 94 (3): 425–438, 1996.
- PINDYCK, R.S; RUBINFELD, D.L. **Microeconomics**. 7.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2009, 768p.
- PONGPECH, J; MURTHY, DNP. “Optimal periodic preventive maintenance policy for leased equipment”. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 12 (1): 52–67, 2006.
- RINSAKA, K; SANDOH, H. “A stochastic model on an additional warranty service contract”. **Computers and Mathematics with Applications**, 51 (2): 179–188, 2006.
- ROCHA, S.P.V. Um modelo integrado de inferência bayesiana e processos markovianos para análise de sistemas reparáveis sujeitos a reparo imperfeito via processo de renovação

- generalizado. Recife, 2006. 120p. (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) / UFPE).
- SMITHSON, P; DICKEY, D. Outsourcing Clinical Engineering Service. In: DYRO, J. (Org.). **The Clinical Engineering Handbook**. New York: Elsevier, 2004.p. 135–136.
- SOUZA, M.A.O. Algoritmos para Maximização da Utilidade Esperada: Uma Aplicação na Seleção de Portfólios Ótimos. Rio de Janeiro, 2009.101p. (Mestrado – Instituto de Matemática: Departamento de Métodos Estatísticos / UFRJ).
- STACKELBERG, H. (Translated by BAZIN, D; HILL, R; URCH, L) **Market Structure and Equilibrium**. New York, Springer New York, 2011, 134p.
- TAGHIPOUR, S. Reliability and maintenance of medical devices. Toronto, 2011. 333p. (PhD. (thesis) – Department of Mechanical and Industrial Engineering/ University of Toronto).
- TARAKCI, H; TANG, K; MOSKOWITZ, H; PLANTE R. “Incentive maintenance outsourcing contracts for channel coordination and improvement”. **IIIE Transactions**, 38 (8): 671–684, 2006.
- VARIAN, H. **Intermediate Microeconomics: A Modern Approach**.8.ed. New York, W.W. Norton & Company, 2010, 816p.
- VERMA, A.K; AJIT, S; KARANKI, D.R. **Reliability and Safety Engineering**. London, Spring London, 2010, 546p.
- WANG, H; PHAM, H. **Reliability and Optimal Maintenance**. London, Springer London, 2006, 346p.
- WATSON, J. **Strategy an Introduction to Game Theory**.3.ed. New York, W. W. Norton & Company, 2013, 512p.
- WEBSTER, T.J. **MANAGERIAL ECONOMICS: Theory and Practice**. New York, Emerald Group Publishing, 2003, 600p.
- WILSON, K; ISON, K; TABAKOV, S. **Medical Equipment Management**. Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2014, 334p.
- YAÑEZ, M; JOGLAR, F; MODARRES. “Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience”. **Reliability Engineering & System Safety**, 77 (2): 167–180, 2002.