

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANIELA MORAIS PEREIRA

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTO  
MÉDICO DE ALTA COMPLEXIDADE POR MEIO DE ANÁLISE DE OBSOLESCÊNCIA

RECIFE

2017

DANIELA MORAIS PEREIRA

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTO  
MÉDICO DE ALTA COMPLEXIDADE POR MEIO DE ANÁLISE DE OBSOLESCÊNCIA

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE  
para a obtenção de grau de Mestre como parte  
das exigências do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Produção  
Área de Concentração: Pesquisa Operacional.  
Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isis Didier Lins.

Recife

2017

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

P436d

Pereira, Daniela Morais.

Determinação do período ótimo de substituição de equipamento médico de alta complexidade por meio de análise de obsolescência / Daniela Morais Pereira. - 2017.  
77 folhas, il., tabs.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Isis Didier Lins.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção.
2. Confiabilidade.
3. Engenharia de manutenção.
4. Equipamentos de diagnóstico por imagem.
5. Gerenciamento de equipamentos médicos.
6. Obsolescência. I. Lins, Isis Didier (Orientadora). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-221

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

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO  
DE MESTRADO DE**

**DANIELA MORAIS PEREIRA**

***“DETERMINAÇÃO DO PERÍODO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTO  
MÉDICO DE ALTA COMPLEXIDADE POR MEIO DE ANÁLISE DE  
OBSOLESCÊNCIA”***

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do (a) primeiro (a), considera a candidata, DANIELA MORAIS PEREIRA, **APROVADA.**

Recife, 26 de abril de 2017.

---

Prof. ISIS DIDIER LINS, Doutora (UFPE)

---

Prof. MARCIO DAS CHAGAS MOURA, Doutor (UFPE)

---

Prof. RICARDO JOSÉ FERREIRA, Doutor (IFPB)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e energia para alcançar mais um grande objetivo de vida.

À família e amigos que acreditaram e se esforçaram junto comigo nesses anos.

Aos professores e colegas do PPGEP/CEERMA, pelas orientações e transmissão de conhecimentos para desenvolvimento de estudos na área de engenharia, em especial à Prof.<sup>a</sup> Isis Didier por todo incentivo.

Ao IMIP, pela grande escola profissional e pessoal ao longo desses anos além de ser principal fonte de dados para desenvolvimento de estudos e pesquisas na área de engenharia hospitalar.

“Precisa continuar a descobrir-te, um pouco mais a cada dia, o verdadeiro e ilimitado Francisco Gaivota. Precisa compreender e treinar. Não acredite no que dizem os seus olhos. O que te mostram é limitação. Olhe com compreensão, descubra o que já sabe e verá como voar.”

(BACH, 2012, p.18)

## RESUMO

A gestão de equipamentos médicos intensivos em tecnologia, especialmente equipamentos de diagnóstico e tratamentos por imagem, tem recebido atenção de Estabelecimento de Assistência à Saúde (EAS) devido ao seu considerável impacto social e econômico. A necessidade de elevados investimentos, assim como custos de manutenção, operação e receita classifica a área destes equipamentos como crítica pela alta direção dos EAS, de maneira que manter os equipamentos disponíveis torna-se um grande desafio do serviço de engenharia clínica. A deficiência em estudos baseados na engenharia de confiabilidade para análise de ciclo de vida de equipamentos médicos incitou o desenvolvimento deste estudo, onde por meio da abordagem probabilística com os dados de histórico de falhas, associados a fatores econômicos como contrato de manutenção, custo de aquisição e revenda, é possível analisar o horizonte de tempo em que é viável manter a mesma máquina e quando deve substituí-la por uma nova. São utilizados quatro modelos matemáticos para esta análise com aplicação prática para um aparelho de ressonância nuclear magnética. Três dos quatro modelos propostos nesta dissertação envolvem a combinação de análise de custos com aspectos relacionados ao processo de falhas e reparos do equipamento analisado modelado via Processo de Renovação Generalizado, que permite a consideração de reparos perfeitos, imperfeitos ou mínimos. Dentre os resultados obtidos é possível determinar o período ótimo viável para manter o equipamento, além de permitir uma comparação entre o equipamento mantido sob regime de aquisição de manutenção avulsa sob ocorrência da falha e quando sob contrato de manutenção a preço fixo.

**Palavras-chave:** Confiabilidade. Engenharia de manutenção. Equipamentos de diagnóstico por imagem. Gerenciamento de equipamentos médicos. Obsolescência.

## ABSTRACT

The management of technology-intensive medical equipment, especially diagnostic and imaging equipment, has received attention from the healthcare institutes due to its considerable social and economic impact. The need for high investments, as well as maintenance, operation and revenue costs classifies the area of this equipment as critical by the top management of the healthcare institute, so that keeping the equipment available becomes a major challenge of the clinical engineering service. The deficiency in studies based on reliability engineering for the analysis of the life cycle of medical equipment prompted the development of this study, where by means of the probabilistic approach with the historical data failures, associated to economic factors such as maintenance contract, acquisition costs and resale, it is possible to analyze the time horizon in which is feasible to maintain the same machine and when it should be replaced by a new one. Four mathematical models are used for this analysis with practical application for a nuclear magnetic resonance equipment. Three of the four models proposed in this dissertation involve the combination of cost analysis with aspects related to the process of failures and repairs of the analyzed equipment modeled through Generalized Renewal Process, which allows the consideration of perfect, imperfect or minimal repairs. Among the obtained results it is possible to determine the feasible optimum period to maintain the equipment, as well as to allow a comparison between the equipment kept under a system of acquisition of single maintenance under the occurrence of the failure and when under a fixed price maintenance contract.

**Keywords:** Reliability. Maintenance engineering. Diagnostic imaging equipment. Medical equipment management. Obsolescence.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – Ciclo de vida das tecnologias em saúde (intensidade de uso em função do tempo)
- Figura 2.2 – Principais impactos com aumento da disponibilidade
- Figura 2.3 – Curva da banheira – Taxa de falha variável no tempo
- Figura 2.4 – Estados do sistema em fase de degradação após reparo
- Figura 2.5 – Categorias de reparos e processos estocásticos pontuais para sistemas reparáveis
- Figura 2.6 – Fluxograma de pseudocódigo de PSO
- Figura 2.7 – Variação do custo anual equivalente submetido às diferentes taxas
- Figura 2.8 - Conflito clássico de vida econômica de equipamentos
- Figura 3.1 – Fluxograma do método do trabalho
- Figura 3.2 – Fluxo de caixa – Primeiro modelo
- Figura 3.3 – Fluxo de caixa – Segundo modelo
- Figura 3.4 – Fluxo de caixa – Terceiro modelo
- Figura 3.5 – Fluxo de caixa – Quarto modelo
- Figura 4.1 – Evolução de realização de procedimentos com finalidade diagnóstica realizados pelo IMIP no período de 2008 a 2015.
- Figura 4.2 – Quantidade de procedimentos por subgrupo com finalidade diagnóstica realizada pelo IMIP no período de 2010 a 2015.
- Figura 4.3 – Quantidade de procedimentos de ressonância magnética realizada pelo IMIP no período de 2008 a 2015, com comparação ao percentual em relação aos exames do estado de PE.
- Figura 4.4 – Sala de exames de Ressonância Magnética
- Figura 4.5 – Sala de comando de Ressonância Magnética
- Figura 4.6 – Número estimado de falhas em relação ao número real (esquerda) e número esperado de falhas por ano (direita)
- Figura 4.7 – Custo de manutenção
- Figura 4.8 – Resultado Primeiro Modelo – Custo equivalente anual
- Figura 4.9 – Resultado Segundo Modelo – Custo equivalente anual
- Figura 4.10 – Comparação de custos com e sem contrato de manutenção
- Figura 4.11 – Resultado terceiro modelo – Custo equivalente anual
- Figura 4.12 – Resultado Quarto modelo – Custo equivalente anual
- Figura 4.13 – Comparação terceiro e quarto modelos

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Influência do parâmetro de forma no comportamento da taxa de falhas

Tabela 4.1 – Tempo entre falhas

Tabela 4.2 – Estatística descritiva dos tempos entre falhas

Tabela 4.3 – Parâmetros do primeiro modelo

Tabela 4.4 – Parâmetros do segundo modelo

Tabela 4.5 – Parâmetros do terceiro modelo

Tabela 4.6 – Parâmetros do quarto modelo

Tabela 4.7 – Resumo dos atributos e resultados obtidos por modelo

## LISTA DE SIGLAS

ACCE – *American College of Clinical Engineering*  
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária  
CRF – *Capital recovery factor*  
EAS – Estabelecimento de assistência à saúde  
EEM – Equipamento eletro médico  
EMH – Equipamento médico-hospitalar  
IGP-DI – Índice geral de preços – disponibilidade interna  
IGPM – Índice geral de preços do mercado  
IMIP – Instituto de Medicina Integral Professor Fernando Figueira  
IPCA – Índice nacional de preços ao consumidor amplo  
MLE – Maximum likelihood estimates  
MTBF – *Mean time between failures*  
MTTR – *Mean time to repair*  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
PHP – Processo homogêneo de Poisson  
PNHP – Processo não homogêneo de Poisson  
PR – Processo de renovação  
PRG – Processo de renovação generalizado  
PSO – *Particle swarm optimization*  
RF – Radiofrequência  
RNM – Ressonância nuclear magnética  
ROCOF – *Rate of occurrence of failures*  
SEC – Serviço de engenharia clínica  
SUS – Sistema Único de Saúde  
TDC – *Total discounted cost*  
UTI – Unidade de tratamento intensivo

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS .....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	EQUIPAMENTOS MÉDICOS.....	17
2.1.1	Gerenciamento de equipamentos médicos .....	18
2.1.2	Análise de ciclo de vida de equipamentos médicos .....	20
2.1.3	Obsolescência de equipamentos médicos.....	23
2.2	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE .....	24
2.2.1	Mecanismos e modos de falha.....	26
2.2.2	Taxa de falha e função intensidade de falhas .....	27
2.2.3	Distribuição Weibull .....	29
2.2.4	Processo de Renovação Generalizado .....	29
2.2.5	Otimização por nuvem de partículas .....	34
2.3	Modelos de obsolescência.....	38
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>44</b>
3.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	44
3.2	MODELOS MATEMÁTICOS .....	45
3.2.1	Primeiro modelo .....	46
3.2.2	Segundo modelo .....	47
3.2.3	Terceiro modelo.....	48
3.2.4	Quarto modelo .....	50
3.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS .....	51
3.4	SIMULAÇÃO .....	51
3.5	AValiação de resultados.....	52
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>53</b>
4.1	INSTITUTO DE MEDICINA INT. PROF. FERNANDO FIGUEIRA – IMIP .....	53
4.2	MECANISMOS E MODOS DE FALHAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA...55	
4.3	DADOS .....	58
4.4	RESULTADOS.....	61

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	72
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de tecnologias médicas tem recebido considerável atenção em Estabelecimentos de Assistência à Saúde (EAS) em virtude dos impactos econômicos e sociais relativos à disponibilidade dos equipamentos médicos para realização de exames e procedimentos complexos. Em particular, equipamentos para diagnóstico por imagem recebem maior atenção devido aos altos custos de investimento e manutenção, elevado retorno financeiro e incremento na reputação do EAS por se tratar de aparelhos de intensa complexidade tecnológica utilizados como apoio às decisões no tratamento de pacientes como, por exemplo, oncológicos. Para EAS que atendem ao Sistema Único de Saúde (SUS), o agravante de escassez de recursos reflete na necessidade de uso mais eficiente das máquinas a fim de atender à demanda crescente da sociedade, chegando à utilização exaustiva do aparelho ao longo de toda sua vida útil. Nesse contexto, observou-se a importância de prever o período mais apropriado para substituição de equipamentos de intensa complexidade tecnológica por meio da avaliação de obsolescência, o que deverá servir como fonte subsidiária de informações à alta administração da instituição para planejamento de aquisição de novos equipamentos.

Atualmente, a análise de obsolescência de equipamentos eletromédicos é vinculada ao estudo de priorização de reposição dos aparelhos considerando o custo como principal atributo para definição de prioridade. Alguns estudos aplicaram teorias de decisão multicritério para definição de prioridade de reposição (KATZ, 1998). Para sistemas industriais mais complexos, os estudos de obsolescência de material para reposição visam, entre outras áreas, a análise de dimensionamento de itens para estoque (BABAI, SYNTETOS & TEUNTER, 2014), determinação de períodos para programa de manutenções preventivas (FIRMINO *et al*, 2007).

A deficiência de estudos que associem análise de custos com análise de confiabilidade para sistemas reparáveis complexos no contexto de equipamentos eletromédicos tornou-se um dos grandes estímulos para o desenvolvimento deste trabalho.

Desta forma, para designar os parâmetros utilizados no modelo proposto é aplicada a modelagem dos dados entre falhas por meio da distribuição paramétrica Weibull com processo de renovação generalizado. A flexibilidade desse modelo em representar sistemas reparáveis de alta complexidade em fase de melhoria ou degradação é vista como característica principal para escolha da distribuição Weibull em detrimento de outras. O

processo de renovação generalizado introduz o conceito do parâmetro de rejuvenescimento dos sistemas reparáveis após submissão aos reparos, de modo que é utilizado para mensurar a eficácia das manutenções prestadas pelo fabricante (MODARRES, KAMINSKIY & KRIVTSOV, 2000). Por meio dos dados reais de histórico de falhas, a estimação dos parâmetros do modelo é dada pelo método de máxima verossimilhança. Visando a uma maior robustez no método, o algoritmo computacional evolucionário de otimização por nuvens de partículas (BRATTON & KENNEDY, 2007) apresenta resultados mais rápidos e mais precisos (FIRMINO *et al.*, 2007), quando comparado a outros métodos como Monte Carlo, por exemplo, utilizado em estudo publicado por Yañez *et al.*, 2002.

Assim, este trabalho propõe quatro modelos matemáticos para a programação ótima do período de substituição de equipamentos médicos considerando atributos de obsolescência, confiabilidade, manutenção e custos. A aplicabilidade de tais modelos é ilustrada por meio de um estudo de caso que envolve também a exploração de dados existentes no sistema de gerenciamento de equipamentos médicos do Serviço de Engenharia Clínica do Instituto de Medicina Integral Professor Fernando Figueira (IMIP), que é uma instituição de saúde de significativa importância na região Nordeste do Brasil. Tal sistema de gerenciamento de tecnologias médicas registra todas as intervenções realizadas nos equipamentos desde sua data de aquisição e instalação, assim como as manutenções realizadas e informações de custos provenientes das manutenções do equipamento.

O desenvolvimento de estudos baseados em confiabilidade para avaliação e gerenciamento de tecnologias médicas tem apresentado uma demanda crescente, visto o aumento do nível de exigência por parte da alta direção, a fim de que haja subsídios para decisões que envolvam razoável montante financeiro. A engenharia de confiabilidade tem fornecido ferramentas cada vez mais usuais e acessíveis para área de gestão de tecnologias médicas, em substituição ao conhecimento tácito e intuitivo por muito tempo utilizado. Relatórios com fundamentos científicos tem elevado a reputação dos serviços de engenharia clínica, tal qual permitido maior participação de engenheiros sobre decisões estratégicas no que tange a gestão hospitalar.

Guedes *et al* (2015) desenvolveram um estudo que visa auxiliar os EAS na melhor decisão entre aquisição de contratos de manutenção, formulado com base no Jogo de Stakelberg. No modelo apresentado, o fabricante considera a possibilidade de diferentes perfis de aversão ao risco para os clientes, propondo os valores de venda do equipamento e valor do contrato de manutenção. A fim de avaliar a viabilidade do pagamento de manutenção avulsa,

a taxa de falhas de um equipamento médico intensivo em tecnologia modelado via processo de renovação generalizado. Então, o cliente deverá optar pela compra ou não do equipamento e, ocorrendo a compra poderá escolher pela aquisição de contrato de manutenção a preço fixo ou pagamento de manutenção avulsa sob demanda.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A escassez de referências sobre determinação de período de obsolescência para equipamentos médicos de alta complexidade implica a importância do desenvolvimento deste trabalho como contribuição inovadora para áreas multidisciplinares como engenharia de manutenção, confiabilidade, gerenciamento de equipamentos médicos, gerenciamento hospitalar entre outras. Além disso, há incentivo para novos estudos sobre assuntos correlacionados como análise de obsolescência programada de equipamentos médicos de menor complexidade tecnológica associando-os a distribuições probabilísticas de falhas, ou ainda a comparação entre tecnologias aplicadas a equipamentos de intensa complexidade tecnológica.

O impacto da indisponibilidade de uma máquina de diagnóstico por imagem de intensa complexidade tecnológica para a sociedade é significativa, dada existência de demanda reprimida para realização de exames pelo SUS. Assim, conseguir dimensionar a vida útil de um equipamento específico que demande um alto valor de investimento para substituição, com base na confiabilidade da máquina serve como subsídio para o planejamento de longo prazo para EAS que dependam de recursos públicos para seu funcionamento.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a formulação e aplicação de modelos matemáticos probabilísticos que indiquem a obsolescência no contexto de equipamentos médico-hospitalares intensivos em tecnologia. Estes modelos são construídos por meio da interação entre fatores econômicos (ex. custos de manutenção, aquisição e revenda) e fatores de confiabilidade por meio da modelagem via distribuição Weibull com processos de renovação generalizados, que modelam as falhas do equipamento analisado.

Como objetivos específicos deste trabalho, citam-se:

- Contextualizar equipamentos médicos, gestão de tecnologias médicas e ciclo de vida de equipamentos;
- Levantar, explorar e determinar parâmetros que contribuam para análise de obsolescência em equipamentos médicos de alta complexidade tecnológica;
- Definir modelo baseado em custo para realização de análise numérica;
- Definir modelos baseados em custos e também em dados de falhas e reparos;
- Levantar dados e analisar informações de equipamento médico de intensiva complexidade tecnológica para aplicação numérica;
- Analisar resultados obtidos com a modelagem por meio de simulações e discorrer conclusões advindas do desenvolvimento do estudo.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 5 capítulos incluindo esta Introdução. No Capítulo 1 é realizada a contextualização do problema, a justificativa, o objetivo geral e objetivos específicos para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 2 contém a fundamentação teórica e embasamento científico para o estudo assim como as definições necessárias para desenvolvimento e compreensão do trabalho. No Capítulo 3, está definida a metodologia proposta para atingir os objetivos específicos e o objetivo geral do trabalho, e a definição dos modelos probabilísticos utilizados. O Capítulo 4 contextualiza o estudo de caso e ambientação para aplicação prática dos modelos propostos, incluindo os resultados obtidos para discussões cabíveis. No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do estudo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 EQUIPAMENTOS MÉDICOS

A Organização Mundial de Saúde (OMS) define equipamentos médico-hospitalares (EMH) como dispositivos médicos que requerem calibração, manutenção, reparos, treinamentos dos usuários e procedimentos para obsolescência e que são usados para propósitos específicos de diagnóstico e tratamento de doenças ou reabilitação decorrentes de doenças ou lesões (ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE, 2011). Podem ser utilizados de forma independente ou em combinação com acessórios, descartáveis, ou outros EMH. A definição de EMH exclui materiais implantáveis, descartáveis ou de uso único segundo OMS (2011).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) apresenta uma definição conjunta de equipamentos e produtos para saúde. Dessa definição, têm-se os EMH como equipamentos de uso médico, odontológico, laboratorial ou fisioterápico de uso direto ou indireto para diagnóstico, terapia, apoio médico-hospitalar, reabilitação, embelezamento e estética ou monitoração de seres humanos (ANVISA, 2014). Ainda de acordo com Anvisa (2014), os EMH podem ser ativos ou não ativos. Os equipamentos ativos são aqueles que dependem de uma fonte de energia e que agem convertendo essa energia. Os equipamentos não ativos são aqueles que não se enquadram entre os equipamentos ativos, como por exemplo, as camas hospitalares, as macas de transporte, as cadeiras de rodas, as mesas cirúrgicas, entre outros conforme consta em Anvisa (2010). Dentre as categorias de EMH definidas por Anvisa (2014), os equipamentos de diagnóstico são aqueles destinados à detecção de informações do organismo humano para auxílio a procedimentos clínicos. Os equipamentos de terapia são aqueles destinados ao tratamento de patologias e os equipamentos de apoio médico-hospitalar são os destinados a fornecer suporte a procedimentos diagnósticos, terapêuticos e cirúrgicos.

Dentre os EMH, é importante apresentar a definição de equipamento eletro médico (EEM). EEM são os equipamentos elétricos destinados ao diagnóstico, tratamento ou monitoração de paciente que estabelecem contato físico ou elétrico com o paciente e/ou fornecem energia para o paciente, ou recebem a que dele provém, e/ou detectam esta transferência de energia (BRASIL, 2012).

Para aumento da eficácia da gestão de equipamentos médicos eles são classificados de acordo com a complexidade tecnológica (BRASIL, 2013). Equipamentos de baixa

complexidade requerem procedimentos simples para manutenção de maneira que os recursos humanos para execução dessas atividades não precisam de elevado grau de instrução e especialidade. Exemplos de equipamentos com essas características são: esfigmomanômetros, balanças, estufas, berço-aquecido, etc.

Equipamentos são classificados como sendo de média complexidade tecnológica quando o recurso humano para realização de manutenções exige um conhecimento mais especializado e adequado para cada tipo de aparelho. Como exemplos dessa classe de equipamentos citam-se: incubadoras, ventiladores pulmonares, monitor de sinais vitais, eletrocardiógrafos, etc.

Por fim, equipamentos classificados como de alta complexidade tecnológica exigem elevado grau de conhecimento e de especialização dos recursos humanos que atuam nas atividades de manutenção. Equipamentos de ressonância magnética e de tomografia computadorizada, aceleradores lineares apresentam alta complexidade tecnológica (CALIL & TEIXEIRA, 1998; BRASIL, 2013). Tais equipamentos possuem tecnologia intensa e complexa, de maneira que mão de obra, peças estratégicas, licenças e *softwares* são fornecidos pelo fabricante a valores extremamente elevados sob alegação de garantia de controle de qualidade e restauração do funcionamento do equipamento ao estado tão bom quanto novo. Isso ocorre como forma de indução para que os clientes assinem contratos de manutenção com o próprio fabricante.

### 2.1.1 Gerenciamento de equipamentos médicos

A evolução tecnológica ao longo da história das sociedades tem acarretado também inovação da medicina e assistência à saúde. No decorrer dos anos, os avanços em tecnologias médicas têm fornecido vasta opção de ferramentas para diagnóstico, reabilitação e tratamento de pacientes. Sendo assim, com a presença constante da tecnologia na área de assistência médica, a engenharia tem desempenhado papel fundamental no que se refere ao desenvolvimento de máquinas e sistemas específicos para assistência à saúde, e a própria manutenção de equipamentos (DYRO, 2003).

De acordo com *American College of Clinical Engineering* (ACCE), o Engenheiro Clínico é um profissional que presta suporte aos avanços de tecnologia para cuidados com os pacientes através da aplicação da engenharia e habilidades em gestão de tecnologias médicas (DYRO, 2003).

O Engenheiro Clínico é o responsável pelo Serviço de Engenharia Clínica (SEC) que gerencia a tecnologia médica em um EAS. Dentre as atribuições existem sete operações básicas pertinentes ao gerenciamento de tecnologias médicas: aquisição, recebimento, instalação, treinamento, manutenções preventivas, manutenções corretivas e desativação de equipamento (ANTUNES *et al.* 2002).

Como estratégia administrativa, muitos hospitais têm implantando o SEC a fim de promover a gestão de tecnologias médicas de maneira eficaz. Desta forma, o objetivo principal destes serviços é fornecer um programa de engenharia amplo que aborde aspectos de instrumentação médica e suporte aos sistemas tecnológicos dos EAS (BRONZINO *et al.*, 2005).

Atualmente, o SEC corresponde à parte de uma equipe multidisciplinar voltada para a assistência à saúde. Desta forma, a interação com diferentes áreas é de extrema importância para uma gestão eficaz das tecnologias médicas de um EAS. De acordo com Dyro (2003) e Bronzino *et al.* (2005), algumas das atividades realizadas pelo SEC são:

- Gestão de tecnologias: desenvolvimento, implementação e coordenação dos programas de engenharia, atividades específicas para inspeção de entrada para aceite de novos equipamentos e instalação de novos aparelhos, desenvolvimento e coordenação dos programas de manutenção corretiva e preventiva, assim como gestão de custos relacionados às manutenções dos aparelhos, dimensionamento de equipe para trabalho, local da assistência técnica e equipamentos de laboratório para calibração e manutenção dos equipamentos médicos;
- Gestão de riscos: avaliação dos riscos atribuídos ao mau funcionamento de EMH ou uso indevido, assim como definir medidas mais adequadas para tratamento dos incidentes;
- Avaliação da tecnologia: estudo e análise de novas tecnologias disponíveis no mercado, considerando adequação ao uso do EAS, relação de custo/benefício, vantagens para incorporação das novas tecnologias para a instituição e avaliação periódica do parque instalado no EAS.
- Concepção, instalação e gestão de projetos: auxílio aos novos projetos de instalação/ampliação ou renovação de instalações do EAS, o que inclui salas de cirurgia, centros de imagem, etc.

- Treinamento: capacitação e desenvolvimento da equipe do SEC para execução das atividades de manutenção e multiplicação de conhecimentos em relação ao uso e armazenamento dos equipamentos.
- Coordenação de serviços terceirizados e fornecedores;
- Desenvolvimento e implementação de protocolos e documentação exigida por agências de fiscalização, acreditação e licenciamento.

### 2.1.2 Análise de ciclo de vida de equipamentos médicos

A análise da vida útil de equipamentos médicos ocorre de forma similar a equipamentos ou sistemas em estudos de confiabilidade. O ciclo de vida de um equipamento está compreendido entre sua incorporação ao parque de equipamentos de um EAS até sua obsolescência. A Figura 2.1 representa graficamente o ciclo de vida de tecnologia em saúde relacionando a intensidade de uso em função do tempo. Durante a fase de incorporação da tecnologia à unidade de saúde, a intensidade de uso aumenta gradativamente à medida que são realizadas operações de aquisição, conferência de aceitação e recebimento, adequação da estrutura para instalação do equipamento e a promoção de treinamentos para os usuários. Na fase de utilização, o aparelho atinge seu grau máximo de uso e devem ser realizadas intervenções de manutenções corretivas em caso de defeitos e falhas e manutenções preventivas programadas. Na fase de abandono ou renovação, há uma diminuição de uso do equipamento devido ao aumento do número de quebras e, em seguida, há o processo de desativação e possível substituição por novo aparelho (BRASIL, 2013).

Durante o processo de aquisição já se deve pensar sobre as operações de recebimento, instalação, treinamento e manutenção e tomar essas informações como base para a escolha entre as opções de marcas e modelos disponíveis no mercado (CALIL & TEIXEIRA, 1998).

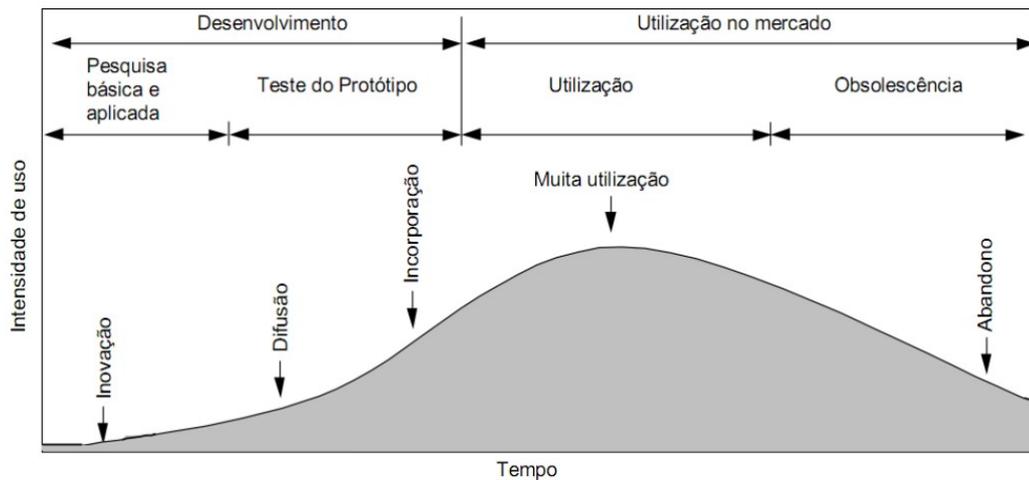


Figura 2.1 – Ciclo de vida das tecnologias em saúde (intensidade de uso em função do tempo)  
 Fonte: Brasil (2013)

Devido ao elevado investimento para aquisição, alto custo de manutenção e elevado retorno financeiro, aparelhos de alta complexidade tecnológica, em especial os equipamentos de diagnóstico por imagem, geralmente recebem atenção especial nos hospitais e clínicas. Os equipamentos de média e alta complexidade representam de 4% a 10% do parque instalado em um EAS, porém podem atingir um percentual de 30% a 60% do valor do parque. Assim, sob esta ótica, garantir a disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos torna-se prioridade no gerenciamento de equipamentos médicos (ANTUNES *et al.* 2002).

A importância clínica destes tipos de equipamentos é bastante considerável para detecção de doenças e tratamentos em geral. Imagens de boa qualidade técnica irão fornecer informações à equipe médica para a condução do melhor tratamento para cada paciente. Em contrapartida, imagens com pouca nitidez ou com presença de artefatos (manchas claras ou escuras de forma e tamanho diverso que aparecem nas telas e impressões) podem ocasionar laudos irreais capazes de induzir erros médicos e administração de condutas indevidas para o tratamento dos pacientes. Desta forma, manter os aparelhos em perfeitas condições de uso, devidamente calibrados e com suas funcionalidades disponíveis é de suma importância para os EAS.

Durante a aquisição de equipamentos médicos de alta complexidade tecnológica devem ser considerados aspectos como: adequação ao uso ao avaliar se a capacidade de produção do aparelho é compatível com o estimado pela diretoria do EAS. Além disso, as limitações técnicas devem ser consideradas no momento da avaliação de incorporação de novas tecnologias. Um segundo aspecto a ser avaliado durante a aquisição dos equipamentos

é o custo de compra: deve-se verificar se o valor ofertado pelo fornecedor é coerente e compatível com o praticado no mercado. A comparação entre diferentes propostas deve contemplar, além da avaliação dos custos, as características técnicas de cada equipamento. Por exemplo, os insumos necessários para uso do equipamento, assim como a estrutura dos fornecedores de tais insumos devem ser analisados a fim de garantir o atendimento à demanda do EAS. Questões de infraestrutura, instalação, assistência técnica, fornecimento de peças para manutenção também devem ser levantadas durante a aquisição dos aparelhos com o acompanhamento da empresa fornecedora para que, após a entrega, o aparelho apresente o desempenho de acordo com o projeto do fabricante (CALIL & TEIXEIRA, 1998).

Para as operações de recebimento, instalação e treinamentos é importante verificar a integridade física das partes que compõem o equipamento, assim como acompanhar todas as etapas até a conclusão da instalação e testes finais da máquina. A instalação de um equipamento de grande porte pode durar semanas a fim de garantir que o aparelho seja entregue em plenas condições de uso conforme previsto durante aquisição. Após conclusão é iniciado o processo de treinamento e capacitação dos usuários. Finalmente, são realizados exames com pacientes para liberação total da máquina (BRASIL, 2013).

Após liberação do equipamento para uso, inicia-se o acompanhamento das ações que visam mantê-lo disponível para uso por maior período de tempo possível. Segundo Viana (2002), os tipos de manutenção se diferenciam pela forma de encaminhamento das intervenções dos equipamentos que compõem um sistema geral. Define-se Manutenção Corretiva não planejada como a ocorrência após falha ou perda de desempenho do equipamento. A Manutenção Preventiva tem como principal objetivo evitar falhas, ou seja, é planejada em intervalos predeterminados ou critérios prescritos no intuito de reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento do item. Na prática, durante a fase de utilização, os SEC nos EAS se concentram nas intervenções de manutenção corretiva e preventiva dos EMH.

A elevada quantidade de equipamentos além da variabilidade de tecnologias, marcas e modelos presentes num EAS podem implicar na necessidade de firmar contratos de manutenções para equipamentos os quais o SEC não possua habilidade, conhecimento e disponibilidade de ferramentas suficientes para realizar serviços de manutenção.

O SEC de um EAS possui atribuições que contemplam processos desde a aquisição dos aparelhos, seguindo pela gestão da manutenção ao longo de toda sua vida útil, até o período de desativação. Uma gestão eficiente deverá promover a gestão de inventário dos

EMH através do controle de todas as intervenções dos equipamentos, mantendo o histórico de ocorrências de cada equipamento atualizado com informações de tempo, peças, mão de obra e custos de cada manutenção.

### 2.1.3 Obsolescência de equipamentos médicos

A fase de abandono ou desativação de um equipamento contempla a análise de obsolescência de uma tecnologia. De acordo com Katz (1998) e Oliveira (2002), os fatores que influenciam a substituição de equipamentos médicos partem de uma política interna institucional, e também estão relacionados à prática clínica que observa e avalia a possibilidade de manter o equipamento desempenhando suas funções em segurança para os pacientes e operadores, em relação às questões técnicas, de mercado, sociais e éticas.

Segundo Burmester, Hermini & Fernandes (2013), alguns aspectos genéricos podem ser utilizados pelo EAS de forma mais geral e direta para justificar a desativação de um EMH. Tais aspectos podem ser segregados em três grupos: Elevado custo de manutenção, Obsolescência tecnológica e Quebra sem condições de recuperação. Com o Elevado custo de manutenção, associa-se o custo acumulado de reparos realizados em equipamentos sendo superior a 30% do custo de aquisição de um novo equipamento com semelhanças técnicas, além disto, o custo excessivo dos insumos necessários à utilização é um fator que pode determinar, na prática, a opção de desativação de determinados equipamentos. Em relação à Obsolescência tecnológica cita-se a incompatibilidade entre a capacidade do equipamento e demanda do serviço, o tempo de uso do equipamento, a reincidência de problemas intrínsecos ao uso e manuseio do aparelho, longos períodos fora de operação e não atendimento às normas e legislações aplicadas aos EAS. E por fim, a Quebra sem condições de recuperação está relacionada à indisponibilidade de peças e serviços que retornem o equipamento a desempenhar suas funções conforme esperado.

Além dos aspectos mencionados, para equipamentos de alta complexidade, análises mais concretas e minuciosas devem ser realizadas a fim de garantir a determinação de desativação de um equipamento, visto que o custo para substituição de aparelhos de grande porte pode ser extremamente alto. No caso do aparelho de ressonância magnética, por exemplo, o valor de aquisição no mercado pode exceder três milhões de reais.

Hoorickx (2008) menciona a dificuldade da indústria de equipamentos eletrônicos em manter equipamentos de longo ciclo de vida vulneráveis às mudanças e indisponibilidade de

componentes eletrônicos de consumo. O autor também menciona tendências que caracterizam indisponibilidade de componentes eletrônicos como, por exemplo, a alteração de produtos para atender à demanda de um mercado dinâmico mais lucrativo. Como equipamentos médicos de longa durabilidade possuem processos demorados de desenvolvimento, validação e homologação de novos equipamentos, o projeto não acompanha as mudanças de mercado e, conseqüentemente, dos componentes de consumo disponíveis; a baixa procura de componentes eletrônicos pelos fabricantes de EMH diminui seu poder de exigência quando comparados às indústrias de computadores e comunicação; os fabricantes de componentes eletrônicos não fornecem garantia de continuidade de produção alterando o projeto sem aviso prévio. Isto acarreta aumento de custos de reengenharia do projeto de equipamentos duráveis, necessidade do aumento do estoque de peças de reposição e, conseqüentemente, o custo total de propriedade a níveis mais elevados do que os previstos.

## 2.2 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

O conceito de confiabilidade tem sido difundido amplamente para análise de sistemas. A certeza de que em algum momento futuro o componente, dispositivo ou sistema irá falhar tem levado ao desenvolvimento de estudos que simulem o funcionamento por um horizonte de tempo definido, para o mais aproximado possível da realidade. Concomitante a isso, o aumento da complexidade dos sistemas, a conscientização do consumidor com aumento do nível de exigência em relação à qualidade dos produtos, o surgimento de leis e regulamentações para com o fabricante sobre o seus processos e produtos e a necessidade de redução de custos de produção, custos de reparo e planejamento de garantias têm impulsionado o interesse no desenvolvimento de pesquisas sobre confiabilidade.

Desenvolver um produto com certos atributos de qualidade significa atender às especificações do projeto no instante da inspeção de qualidade de forma pontual. Porém, a análise das falhas no domínio do tempo é vista como uma evolução do controle de qualidade, para a chamada engenharia de confiabilidade (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

A previsão de ocorrência de falhas permite o conhecimento de por que, quando e como as falhas acontecem, de forma que, associada ao conhecimento de construção, funcionamento e operação do sistema é possível promover melhoria do projeto, otimização do desempenho do sistema, maximização dos recursos envolvidos, planejamento de manutenções programadas, minimização de riscos de acidentes, dimensionamento de peças de reposição,

programação de substituição de ativos e bens de capital, entre outras ações. Isso geralmente representa o processo determinístico da análise de confiabilidade (MODARRES, KAMINSKIY & KRIVTISOV, 2000).

Contudo, considerando as incertezas envolvidas nas projeções de ocorrência de falhas no domínio do tempo, o processo probabilístico da análise define confiabilidade como sendo a probabilidade de um componente ou sistema desempenhar sua função sem falhas por um período de tempo, quando utilizado em condições específicas (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

Como complemento à definição acima, é importante fazer referência ao conceito de disponibilidade como sendo a probabilidade que um sistema esteja operacional em dado instante de tempo quando submetido a condições específicas. Uma das formas básicas do cálculo de disponibilidade é apresentada na Equação (2.1), a qual considera os períodos de operação e os períodos de reparo, e calcula o percentual do tempo que o sistema se encontra disponível para uso:

$$Disponibilidade = \frac{Tempo\ total\ de\ operação}{Tempo\ total\ de\ operação + Tempo\ total\ de\ reparo} \quad (2.1)$$

Assim, segundo Modarres, Kaminskiy & Krivtsov (2000), confiabilidade e disponibilidade representam duas importantes medidas de desempenho de sistemas não reparáveis e reparáveis, respectivamente, pois influenciam diretamente no desempenho, no ciclo de vida e vida econômica de itens.

Sobre equipamentos médicos, a disponibilidade pode ser avaliada em relação aos impactos econômicos e sociais que promovem. A Figura 2.2 relaciona o aumento da disponibilidade dos equipamentos e consequências para os EAS. Equipamentos com mais tempos em operação acarretam em aumento do faturamento, diminuição dos custos de manutenção corretiva e redução de altos investimentos para substituição repentina de novos equipamentos. Em relação aos impactos sociais, máquinas disponíveis para uso por maior período de tempo geram aumento no atendimento à sociedade, promovem agilidade no diagnóstico e tratamento dos pacientes e, como consequência, aumentam a reputação do EAS.

Segundo Rausand & Hoyland (2004), para sistemas passíveis de manutenção, chamados sistemas reparáveis, é importante fazer alusão ao conceito de manutenibilidade que representa a probabilidade de que um sistema no estado de falha possa retornar ao estado de

funcionamento em determinado período de tempo quando o reparo é realizado de acordo com procedimentos específicos. Consequências de melhoria no aumento da manutenibilidade de sistemas é a redução do tempo necessário para restaurar o funcionamento após ocorrência de falha.

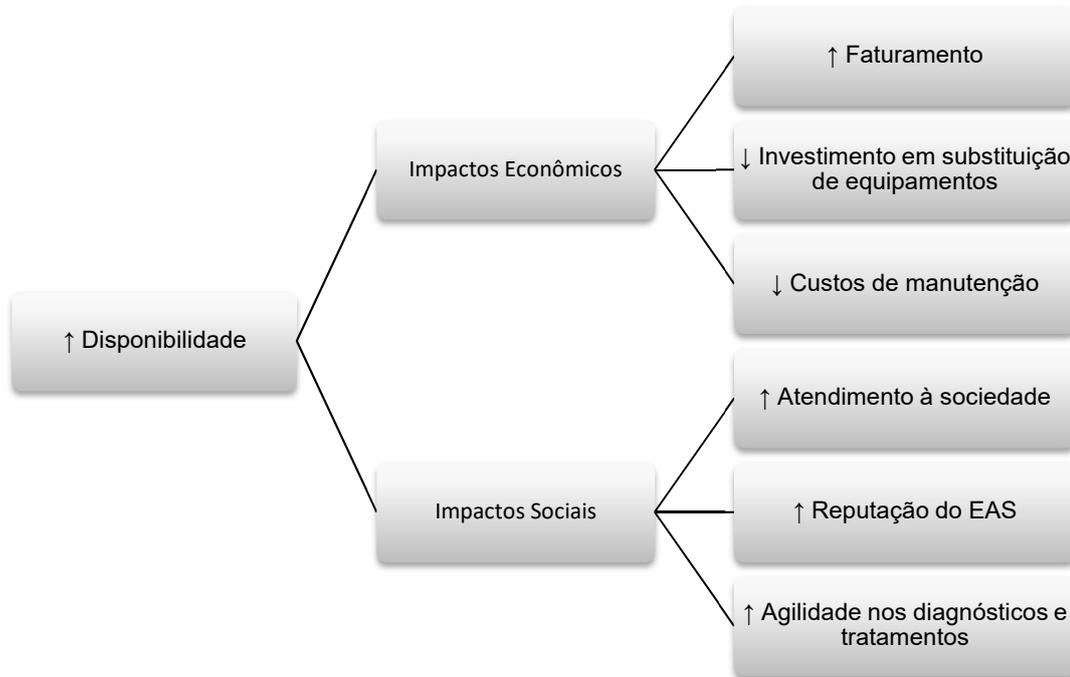


Figura 2.2 – Principais impactos com aumento da disponibilidade  
 Fonte: Esta pesquisa (2017)

Com base nas medidas de performance como confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, outros conceitos podem ser desenvolvidos para melhor análise de desempenho dos itens e promover estudos mais direcionados para as partes que compõem o sistema como um todo. Como exemplo, a taxa de falhas ou número de falhas em um período de observação, o tempo médio entre falhas (*mean time between failures* – MTBF), o tempo médio de reparo (*mean time to repair* – MTTR) (O’CONNOR & KLEYNER, 2012). Na prática o tempo médio para reparo poderá indicar o período o qual uma máquina ou equipamento está indisponível para uso, ou seja, fora de operação. Economicamente falando, é possível mensurar o quanto o equipamento deixa de produzir durante o período de reparo.

### 2.2.1 Mecanismos e modos de falha

Modarres, Kaminskiy & Krivtsov (2000) definem falha como sendo o resultado da existência de uma fonte de mudanças e ocorrência de condições em uma determinada situação. Mesmo os sistemas possuindo uma capacidade intrínseca de manter seu estado de funcionamento diante certas mudanças, quando a intensidade da fonte de mudança ultrapassa tal tolerância a falha pode ocorrer. As fontes de mudança, ou também chamados de eventos adversos, podem ser naturais, artificiais, internos ou externos ao sistema. Um projeto inadequado, erro humano, falta de procedimentos de construção e produção, execução inadequada de manutenção, realização de procedimentos e testes inadequados e falha de proteção contra ações externas e ambientais que causam degradação do item são exemplos de causas geradoras de falhas em sistemas. Além disso, podem ocorrer individualmente ou combinadas entre si.

Mecanismos de falhas correspondem aos processos físicos que levam às falhas. Através da análise de causa e efeito é possível identificar o mecanismo de falha a que o sistema foi exposto (MODARRES, KAMINSKIY & KRIVTSOV, 2000).

Já os modos de falhas representam diferentes falhas (efeitos) como sendo a ocorrência de um ou mais mecanismos de falha (causa). Na engenharia de confiabilidade é comum categorizar falhas distintas de acordo com o impacto que causam no desempenho do sistema ou componentes, estas categorias correspondem aos modos de falhas.

## 2.2.2 Taxa de falhas e função intensidade de falhas

Nos estudos de confiabilidade é comum abordar quatro funções básicas para análise de um sistema ou item. Por meio da Função densidade de probabilidade –  $f(t)$ , Função acumulada da falha –  $F(t)$ , Função confiabilidade –  $R(t)$  e Taxa de falha –  $h(t)$  são desenvolvidas as distribuições probabilísticas amplamente utilizadas para descrever e/ou simular o comportamento de um sistema. Estas funções básicas possuem relação entre si (MODARRES, KAMINSKIY & KRIVTSOV, 2000).

A análise da taxa de falhas é de grande importância para estudos de confiabilidade, pois permite modelar matematicamente o comportamento do sistema, e pode ou não variar no tempo (crescente, decrescente ou constante). A Figura 2.3 exemplifica graficamente o significado da variação da taxa de falhas no tempo, através da curva da banheira. A taxa decrescente implica em melhoria de sistema após realização de reparos ou revisões, por exemplo, o recall de sistemas em garantia do fabricante para substituição de componentes por

outros de melhor qualidade, acarretando o aumento da confiabilidade do sistema após reparo. Uma taxa de falhas constante pode ser o indicativo de ocorrência de falhas externas ao sistema. Taxa de falha crescente podem ser indicativo de desgaste como principal modo de falha do sistema (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

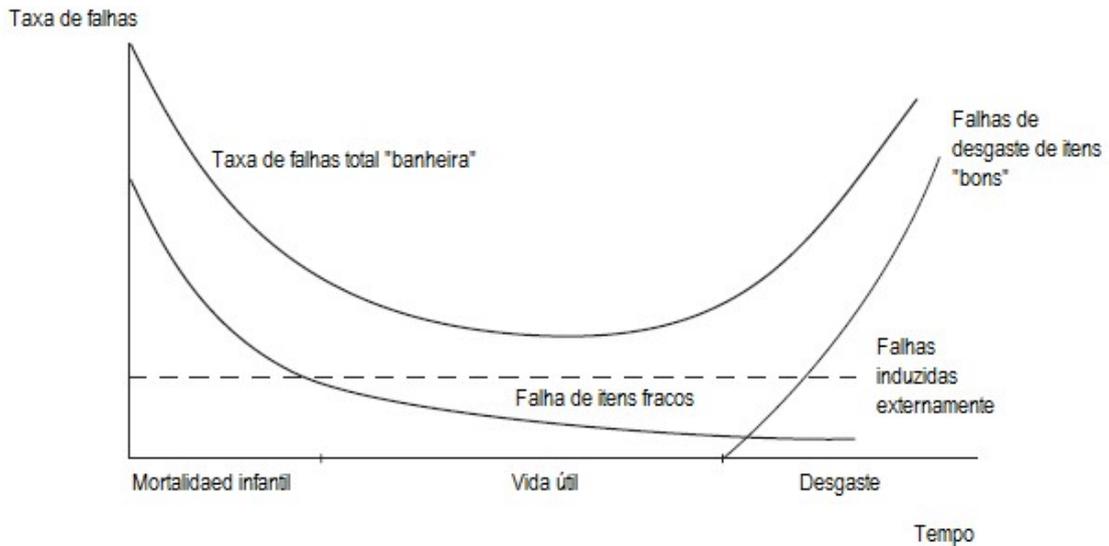


Figura 2.3 – Curva da banheira – Taxa de falha variável no tempo  
 Fonte: O'CONNOR & KLEYNER (2012), p. 09 (adaptado)

Para seguir com a compreensão de medidas de confiabilidade, é importante a distinção entre itens reparáveis e não reparáveis. Para itens ou sistemas não reparáveis a confiabilidade está associada à probabilidade do tempo de vida, ou seja, quando a primeira e única falha pode acontecer. Assim, após a ocorrência da falha o componente ou sistema devem ser substituídos por completo. Já o sistema é dito como reparável quando após ocorrência de uma falha é possível ser colocado novamente em operação sem a necessidade de substituição por completo, ou seja, o sistema é passível de manutenção e reparos. Desta forma, surge o interesse da análise quantitativa de falhas que podem vir a ocorrer em determinado horizonte de tempo.

Faz-se necessário compreender o comportamento das falhas posteriores ao primeiro evento de falha. Dessa maneira, seja a idade de um sistema  $t$ , a probabilidade de ocorrência de falha no período  $t + \Delta t$ , sendo  $\Delta t$  muito pequeno, é denominada de função intensidade de falha. Assim, a função intensidade de falhas de um sistema irá governar a ocorrência de cada falha sucessiva após ocorrência da primeira delas (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

### 2.2.3 Distribuição Weibull

Nos estudos de confiabilidade existem diversos tipos de distribuições probabilísticas. Dentre elas, uma amplamente difundida em confiabilidade e que foi utilizada para o desenvolvimento deste estudo é a distribuição contínua Weibull. Uma das peculiaridades da distribuição Weibull é a flexibilidade para modelar diferentes taxas de falhas (decrecente, constante, crescente) relativas a diferentes regiões da curva da banheira (Figura 2.3), através de diferentes valores que seu parâmetro de forma possa assumir. A variação do valor do parâmetro  $\beta$  causa influência no comportamento da taxa de falhas conforme apresentado na Tabela 2.1. Além do parâmetro de forma  $\beta$ , a distribuição Weibull também apresenta o parâmetro de escala  $\alpha$  (O'CONNOR & KLEYNER, 2012).

*Tabela 2.1 – Influência do parâmetro de forma no comportamento da taxa de falhas*

<b>Valor do parâmetro <math>\beta</math></b>	<b>Propriedade da taxa de falhas</b>
$0 < \beta < 1$	Taxa de falhas decrescente
$\beta = 1$	Taxa de falhas constante (Dist. Exponencial)
$1 < \beta < 2$	Taxa de falhas crescente e côncava
$\beta = 2$	Taxa de falhas crescente e linear (Dist. Rayleight)
$2 < \beta < 3$	Taxa de falhas crescente e convexa
$\beta \geq 3$	Taxa de falhas crescente (Dist. Normal)

*Fonte: O'CONNOR & KLEYNER (2012), p. 09 (adaptado)*

### 2.2.4 Processo de renovação generalizado

Visto que sistemas reparáveis correspondem aos sistemas que podem ser submetidos a reparo para retornar ao estado de funcionamento, tais reparos podem ser avaliados como processos estocásticos pontuais a fim de que suas características e especificidades possam ser compreendidas através de modelagem matemática. Segundo Yañez, Joglar & Modarres (2002), um sistema pode retornar ao funcionamento em cinco estados distintos após reparos, conforme Figura 2.4. Podem retornar ao funcionamento de maneiras extremas como pior do que antes do reparo ou em melhor condição do que se substituído por um novo sistema. Pode assumir estados intermediários de “tão ruim quanto velho”, “melhor do que velho e pior do que novo” ou “tão bom quanto novo”. Cada um destes estados, assim como respectivas categorias de reparos, pode ser analisado por meio de modelos probabilísticos. Além disso, esses termos são adequados para sistemas que se encontram em processo de degradação (terceira fase da curva da banheira).

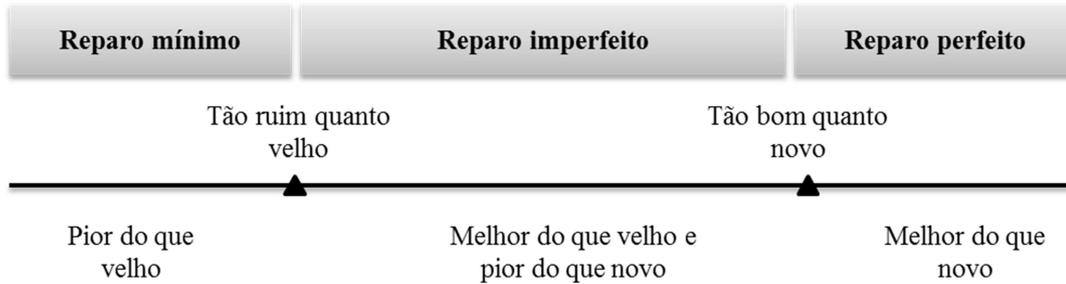


Figura 2.4 – Estados do sistema em fase de degradação após reparo

Fonte: Este trabalho (2017)

As categorias de reparos são apresentadas na Figura 2.5, onde o reparo perfeito corresponde ao reparo que retorna o sistema às condições de tão bom quanto um novo ou melhor do que novo. O reparo imperfeito ou reparo normal retorna o sistema ao estado de funcionamento a qualquer nível de condição de funcionamento, enquanto que o reparo mínimo retorna o sistema à condição de funcionamento de tão ruim quanto o velho.

O processo de Poisson foi proposto inicialmente pelo matemático francês Siméon Denis Poisson (1781-1840). O Processo homogêneo de Poisson (PHP) tem como premissa que os tempos de intercorrência, seja tempos entre falhas seja tempo entre reparos, são independentes e exponencialmente distribuídos com a mesma taxa ao longo do tempo. O processo de renovação (PR) parte do princípio de que os tempos de intercorrência são independentes e identicamente distribuídos admitindo uma distribuição probabilística arbitrária. Admite que ocorrendo falha no sistema, o mesmo será restaurado para uma condição de “tão bom quanto novo”, caracterizando um reparo perfeito. O processo não homogêneo de Poisson (PNHP) difere do PHP, pois admite que a taxa de ocorrência pode variar ao longo do tempo, ou seja, os tempos de intercorrência não são nem independentes nem identicamente distribuídos, o que caracteriza então o reparo mínimo para retorno do sistema ao estado de funcionamento.

PNHP e PR são considerados os casos extremos com o reparo mínimo e reparo perfeito, respectivamente. As condições intermediárias compõem a categoria de reparo imperfeito ou reparo normal, onde o sistema retorna à condição de funcionamento melhor do que velho e pior do que novo (RAUSAND & HOYLAND, 2004).

Vários estudos para modelagem de reparo imperfeito foram propostos. Kijima & Sumita (1986) propõem dois modelos que permitem modelar as diferentes categorias de reparos, por meio do chamado processo de renovação generalizado (PRG), os quais utilizam o conceito de idade virtual em seu desenvolvimento. Modelos de idade virtual utilizam o

parâmetro  $q$  chamado de parâmetro de rejuvenescimento, que representa o grau de eficácia de uma ação de reparo através da redução da idade real do sistema que foi submetido a manutenções sucessivas. Os valores de  $q$  permitem a representação das diferentes categorias de reparos, de forma que:  $q = 0$  representa idade virtual nula, ou seja, ocorrência de um reparo perfeito;  $0 < q < 1$  corresponde à ocorrência de reparo imperfeito, tal que a idade virtual do sistema é uma fração da idade real do mesmo. O parâmetro  $q = 1$  indica que a idade virtual é exatamente igual à idade real, o que corresponde à ocorrência de um reparo mínimo no sistema. Valores de  $q < 0$  e  $q > 1$  são possíveis, mas não obtidos usualmente em casos práticos. O  $q < 0$  representa que a manutenção realizada deixou o sistema em condição “melhor do que novo”, e  $q > 1$  indica que o reparo após falha levou o sistema à condição de “pior do que velho” (ROCHA, 2006).

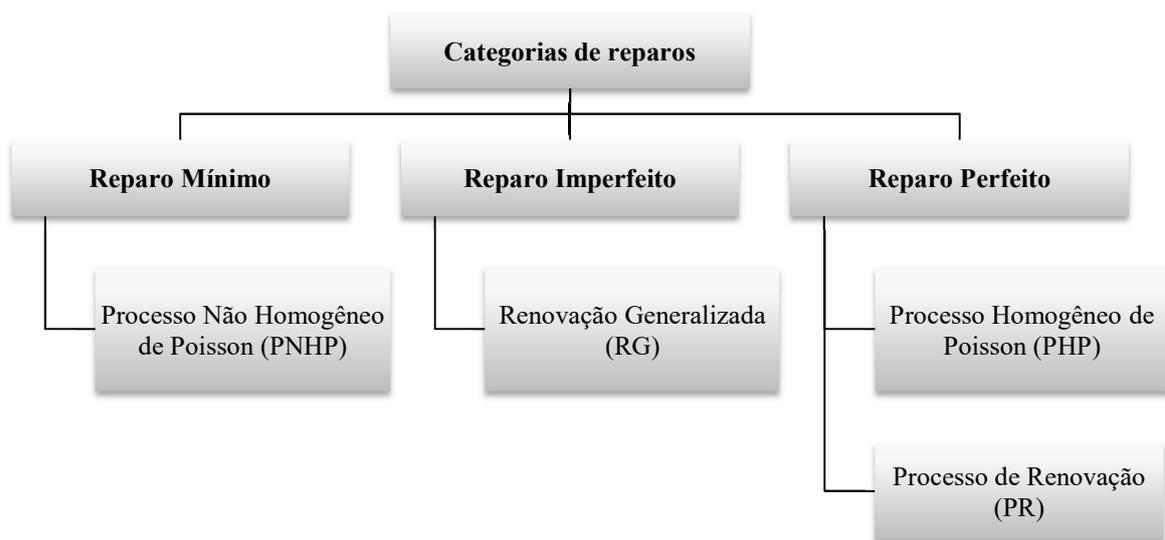


Figura 2.5 – Categorias de reparos e processos estocásticos pontuais para sistemas reparáveis  
 Fonte: RAUSAND & HOYLAND (2004), (adaptado)

Admitindo-se a flexibilidade da distribuição Weibull para modelagem de dados de falhas, por meio do desenvolvimento da função acumulada de probabilidade, o resultado na função de distribuição acumulada condicional é apresentado na Equação (2.2):

$$F(t_i | s_{i-1}) = 1 - \exp \left[ \left( \frac{s_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta - \left( \frac{t_i + s_{i-1}}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

em que,  $\alpha$  é o parâmetro de escala,  $\beta$  o parâmetro de forma, e  $s_{i-1}$  equivale à idade virtual do sistema logo após o reparo no instante  $i$ . A fim de introduzir o conceito de idade virtual na Equação (2.2) com base na teoria já apresentada nessa seção, é possível obter a Equação (2.3):

$$F(t_i) = 1 - \exp \left[ \left( \frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left( \frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right], \quad s_{i-1} = q \cdot \sum_{j=1}^{i-1} t_j \quad (2.3)$$

Alguns pesquisadores desenvolveram estudos sobre a estimação de parâmetros do modelo de PRG-Weibull. Dentre eles, Yañez, Joglar & Modarres (2002) desenvolvem uma solução baseada em estimadores de máxima verossimilhança associado à simulação de Monte Carlo para estimação do número de falhas. A partir da Equação (2.3), aplicando a metodologia de máxima verossimilhança com respectivas derivadas parciais em relação aos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $q$ , com auxílio de métodos numéricos e ferramentas computacionais é possível estimar os parâmetros do modelo para então realizar análise dos dados, estimar número de falhas, entre outras avaliações possíveis.

De forma geral, obter parâmetros estimados de cada modelo significa seguir as etapas de cada método utilizando como dados informações de campo obtidas a partir de testes ou registros como, por exemplo, tempo da falha, tempo entre falhas, tempo de reparo e outros.

Um dos métodos de estimação de parâmetros é através do método da máxima verossimilhança (*maximum likelihood estimates* – MLE). O princípio deste método é a obtenção analítica de valores mais prováveis dos parâmetros da distribuição para um conjunto de dados através da maximização da função de verossimilhança. Sendo a função de verossimilhança  $L$ , e  $f$  uma função de densidade de probabilidade de variáveis independentes e identicamente distribuídas  $t_i$ , com  $k$  parâmetros  $\theta$ ,  $L$  é definida pela Equação (2.4):

$$L = f(t_1, t_2, \dots, t_n | \theta_1, \dots, \theta_k) = \prod f(t_i | \theta_1, \dots, \theta_k) \quad (2.4)$$

Aplicando logaritmo na Equação (2.4), obtém-se a Equação (2.5):

$$\ln L = \sum_i^n \ln f(t_i | \theta_1, \dots, \theta_k) \quad (2.5)$$

Os parâmetros estimados pela função são obtidos através dos valores que maximizam a função  $\ln L$ . Para isto aplica-se a derivada parcial em relação a cada um dos parâmetros e iguala-se a zero. Para o caso da distribuição Weibull-PRG, os MLE's são dados pela aplicação do método na Equação (2.4), a qual a derivada parcial em  $\alpha$ ,  $q$  e  $\beta$  resultam nas Equações (2.6) (2.7) e (2.8), respectivamente (YAÑES, JOGLAR & MODARRES, 2002).

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\ln(L)]}{\partial \alpha} = & \frac{\beta}{\alpha^{\beta+1}} \left[ \sum_{i=2}^n \left[ \left( t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left( q \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta \right] \right] + \frac{\beta}{\alpha} \left[ \left( \frac{t_1^\beta}{\alpha^\beta} \right) - (n) \right] \\ & + \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{T - q \sum_{j=1}^n t_j}{\alpha} \right)^\beta - \frac{\beta}{\alpha} \left( q \sum_{j=1}^n t_j \right)^\beta = 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\ln(L)]}{\partial q} = & \sum_{i=2}^n \left[ \frac{(\beta - 1) \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j} + \frac{\beta q^{(\beta-1)} (\sum_{j=1}^{i-1} t_j)^\beta}{\alpha^\beta} \right. \\ & \left. - \beta \left( \frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left( \frac{\sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right) \right] + \frac{\beta}{q} \left( \frac{q \sum_{j=1}^n t_j}{\alpha} \right)^\beta \\ & - \beta \left( \frac{T + q \sum_{j=1}^n t_j}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left( \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{\alpha} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial[\ln(L)]}{\partial\beta} = & \left[ \frac{n}{\beta} + \ln(t_1) - n \ln \alpha - \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{t_i}{\alpha}\right) \right] \\
& + \sum_{i=2}^n \ln\left(t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j\right) \\
& - \sum_{i=2}^n \left[ \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right) \right] \\
& + \sum_{i=2}^n \left[ \left(\frac{q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right) \right] \\
& - \left[ \left(\frac{T + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{T + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha}\right) \right] \\
& + \left[ \left(\frac{q \sum_{j=1}^n t_j}{\alpha}\right)^\beta \ln\left(\frac{q \sum_{j=1}^n t_j}{\alpha}\right) \right] = 0
\end{aligned} \tag{2.8}$$

### 2.2.5 Otimização por nuvem de partículas

A fim de obter uma maior precisão nos resultados de estimação por máxima verossimilhança dos parâmetros, para este estudo foi utilizado o algoritmo de otimização via nuvem de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO). (FIRMINO *et al.*, 2007) (BRATTON & KENNEDY, 2007).

Segundo Oliveira, Silva & Aloise (2004), PSO é uma técnica de computação evolucionária inspirada no comportamento e dinâmica de movimentos de pássaros em busca de um alvo (alimento, por exemplo) através do esforço conjunto. Inicialmente foi desenvolvido para problemas de otimização com variáveis contínuas. Contudo, recentes estudos foram propostos para variáveis discretas. Os algoritmos de nuvem de partículas abstraem o processo natural do voo aleatório de um bando de pássaros em busca de uma posição mais adequada, sendo esta a que representa a solução ótima do problema. O espaço de busca do problema representa o conjunto de possíveis soluções, e cada posição de uma

partícula significa uma possível solução para o problema. O comportamento de cada partícula é baseado tanto na experiência de movimentos anteriores quanto no resultado da interação com demais partículas do conjunto. O conjunto de partículas tende a preservar as posições “melhores”, ou seja, mais próximas ao ponto ótimo e descartar posições “piores”.

De forma genérica, o algoritmo de nuvens de partículas inicia através de variáveis aleatórias, ou pré-definidas, de posição e velocidade. Cada partícula conhece sua posição no espaço, sua posição em relação aos vizinhos e sua velocidade para que então possa voar sobre o espaço de busca. Por meio do conhecimento das coordenadas de localização, cada partícula pode ajustar seu percurso de voo através da escolha entre seguir o próprio caminho, seguir para sua melhor posição encontrada até o momento, ou seguir para a melhor posição encontrada por algum de seus vizinhos. Desta maneira, o conjunto de partículas é inserido num espaço de busca na intenção de procura por local ótimo por meio de decisões baseadas em procedimentos determinísticos. Por fim, a condição de parada é a estagnação, ou seja, quando não ocorrerem mais melhorias ou quando atingir o limite de iterações pré-estabelecidas (OLIVEIRA, SILVA & ALOISE, 2004).

Cada partícula é observada como um ponto em espaço  $d$ -dimensional. E a  $i$ -ésima partícula é representada pela Equação (2.9), e o índice  $g$  representa a melhor partícula entre todas as partículas do conjunto ao final de cada interação.

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{id}) \quad (2.9)$$

A posição da  $i$ -ésima partícula que representa sua melhor aptidão é dada pela Equação (2.10):

$$P_i = (P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, \dots, P_{id}) \quad (2.10)$$

A velocidade, ou taxa de mudança de posição de cada partícula é definida pelo vetor expresso na Equação (2.11):

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, V_{i3}, \dots, V_{id}) \quad (2.11)$$

Bratton & Kennedy (2007) discorrem sobre a movimentação das partículas baseada nas Equações (2.12) e (2.13), em que a Equação (2.12) calcula a velocidade da  $i$ -ésima

partícula, e a Equação (2.13) refere-se à posição da  $i$ -ésima, partícula por meio da relação dos fatores de sociabilidade, fator de individualidade, velocidade máxima de cada uma das partículas da população, número de partículas em cada nuvem, número de nuvens no espaço de busca e fator de constrição de cada partícula. O fator de sociabilidade deverá determinar a atração de cada partícula para a melhor posição encontrada por qualquer uma das partículas da nuvem. O fator de individualidade determina a atração da partícula pela melhor posição já encontrada por si própria. A velocidade máxima associada ao fator de constrição irá delimitar o movimento em intensidade e direção de cada partícula (KENNEDY & ERBERHART, 2001).

$$v_{id}(m + 1) = \chi \{ v_{id}(m) + c_1 u_1 [p_{id}(m) - s_{id}(m)] + c_2 u_2 [p_{gd}(m) - s_{id}(m)] \} \quad (2.12)$$

$$s_{id}(m + 1) = s_{id}(m) + v_{id}(m + 1) \quad (2.13)$$

Sendo:

$v_{id}$  – velocidade da  $i$ -ésima partícula;

$m$  – número da iteração;

$\chi$  – fator de constrição que evita explosão de velocidade durante as interações;

$c_1$  e  $c_2$  – constantes positivas;

$u_1$  e  $u_2$  – números aleatórios uniformes e independentes entre  $[0, 1]$ ;

$p_{id}$  – melhor posição já ocupada pela  $i$ -ésima partícula;

$s_{id}$  – posição da  $i$ -ésima partícula;

$p_{gd}$  – melhor posição já ocupada por qualquer partícula da nuvem até o momento.

Para PSO, a solução ótima é chamada de *fitness*. Cada partícula armazena as coordenadas no espaço associadas à *fitness* encontradas até o momento. Essa coordenada é chamada de *pbest*. O melhor valor de localização obtido por qualquer partícula da nuvem é chamado de *gbest*. (BRATTON & KENNEDY, 2007)

Em resumo, o fluxograma do algoritmo de otimização via PSO é apresentado na Figura 2.6, baseado em comparação e atualização de valores até atingir as condições de parada e obter solução ótima do problema. Para o desenvolvimento deste estudo, os critérios

de parada são os parâmetros que tendem a levar as derivadas parciais em relação aos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $q$  das funções de log verossimilhança ao valor mais próximo de zero.

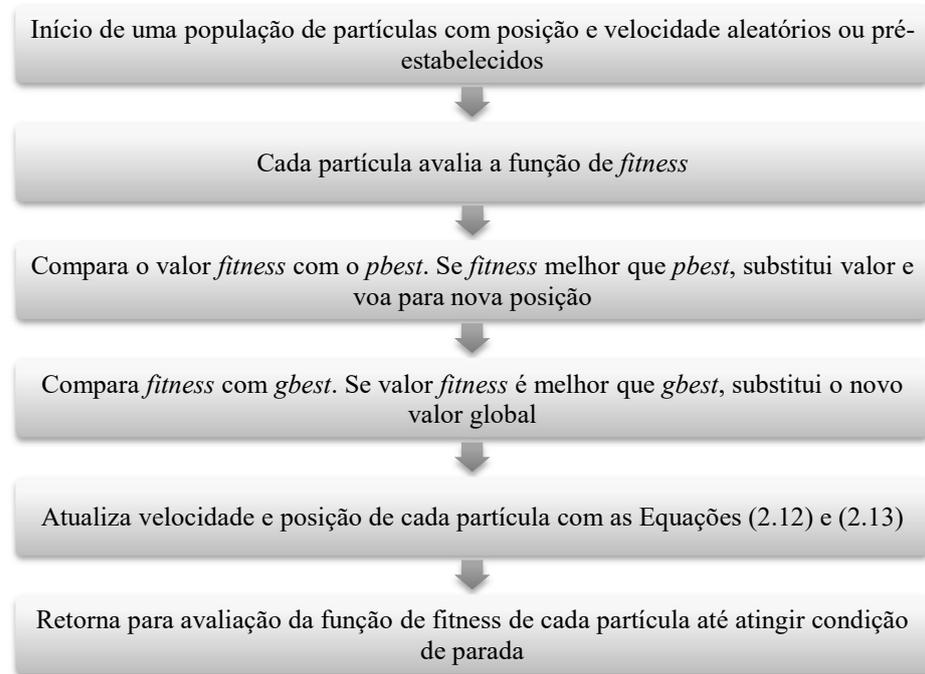


Figura 2.6 – Fluxograma de pseudocódigo de PSO

Fonte: Este trabalho (2017)

Firmino *et al.* (2007) propõe uma comparação entre PSO e a simulação pelo método de Monte Carlo proposto por Yañez, Joglar & Modarres (2002), em estimadores de máxima verossimilhança, com intuito de mensurar a dispersão da solução do problema e o tempo para obtenção da mesma. Como resultados, observou-se que em 30 repetições, o pior tempo do PSO é melhor do que o melhor tempo da simulação Monte Carlo, com um desvio-padrão de tempo 14 vezes menor no PSO. E, os valores estimados de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $q$  resultam em derivadas parciais mais próximas de zero quando obtidos via PSO com menor variabilidade de resultados.

Corrêa *et al.* (2016) desenvolvem um estudo que visam evidenciar uma maior flexibilidade do q-Weibull-PRG em relação ao Weibull-PRG para modelagem do processo de falha de sistemas reparáveis levando em conta a efetividade do reparo. Tal flexibilidade está associada ao parâmetro  $q$  da distribuição que permite alteração da forma e escala da curva, permitindo um melhor ajuste da função. Para valores estimados de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $q$  e  $r$  por máxima verossimilhança, a metodologia de PSO apresenta-se como uma ferramenta de grande potencial visto que os resultados após 30 repetições indicam uma baixa variabilidade. A

aplicação numérica conclui que a distribuição q-Weibull-PRG deve ser observado como capaz de modelar uma variedade de situações reais no contexto da engenharia de confiabilidade.

Baseado neste contexto de maior precisão e velocidade para obtenção de resultados, a aplicação do PSO no desenvolvimento deste estudo está direcionado exclusivamente à estimação dos parâmetros das equações que serão utilizados para estimar o número esperado de falhas por período, a partir dos tempos entre falhas obtidos do histórico de manutenções de uma máquina intensiva em tecnologia médica.

## 2.3 MODELOS DE OBSOLESCÊNCIA

Devido à escassez de estudos relacionados à obsolescência tecnológica de equipamentos médicos de intensiva complexidade, foram analisados trabalhos que tratam de obsolescência de bens e sistemas reparáveis para fundamentação deste estudo.

Conforme Mellal *et al.* (2013), a obsolescência tecnológica dos sistemas industriais é caracterizada pela existência de unidades que possuem funcionalidades idênticas, mas com um melhor desempenho. Os autores possuem o objetivo de definir uma abordagem para obter o número ideal de sistemas industriais obsoletos que devem ser substituídos por novas unidades. A ideia principal é a aplicação de algoritmo genético, considerando a frequência de falhas, a influência dos fatores de ambiente e segurança dos sistemas antigos e o custo de aquisição e implementação de novas unidades.

Segundo Campbell, Jardine & McGlynn (2011), existem dois conflitos chaves para estabelecimento da vida econômica de equipamentos de capital:

1. Aumento dos custos de manutenção e operação ao longo do tempo;
2. Redução do custo de propriedade do bem em funcionamento, devido à amortização do custo de investimento inicial ao longo de um período de tempo extenso.

Quando se trata de avaliação da vida econômica de ativos, é importante avaliar a questão de fluxo de caixa, ou seja, é imprescindível entender que o valor do dinheiro muda ao longo do tempo, devendo então todos os valores de fluxo de caixa ser convertidos para o valor atual. Uma das maneiras de realizar a análise se dá por meio da conversão dos custos totais descontados (*total discounted cost – TDC*) associados ao custo equivalente anual (*equivalent annual cost – EAC*). Para tanto, é necessário introduzir o conceito de fator de recuperação de capital (*capital recovery factor – CRF*) que é dado pela Equação (2.14), em que  $i$  representa a taxa econômica utilizada, por exemplo, índice geral de preços do mercado (IGPM), índice

nacional de preços ao consumidor amplo (IPCA), índice geral de preços – disponibilidade interna (IGP-DI), dentre outras disponíveis no mercado. Para ciclos muito grandes (infinitos)  $CRF = i$ .

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.14)$$

O TDC está definido matematicamente pela expressão da Equação (2.15), e representa os cálculos de todo investimento realizado no equipamento até o período  $n$ , onde ocorrerá a substituição do ativo, onde  $C_n$  representa o valor investido no respectivo período  $n$ .

$$TDC = C_0 + C_1 \left(\frac{1}{1+i}\right)^1 + C_2 \left(\frac{1}{1+i}\right)^2 + (\dots) + C_n \left(\frac{1}{1+i}\right)^n \quad (2.15)$$

Desta maneira, o custo equivalente anual é dado pela Equação (2.16):

$$EAC = TDC * CRF \quad (2.16)$$

A análise de custo anual equivalente para diferentes períodos de tempo irá propiciar o tempo ótimo para decisão entre manter o equipamento velho em funcionamento ou substituir por novo, conforme exemplo na Figura 2.7, que representa graficamente uma comparação entre curvas de custos anuais equivalentes submetidas às diferentes taxas econômicas.

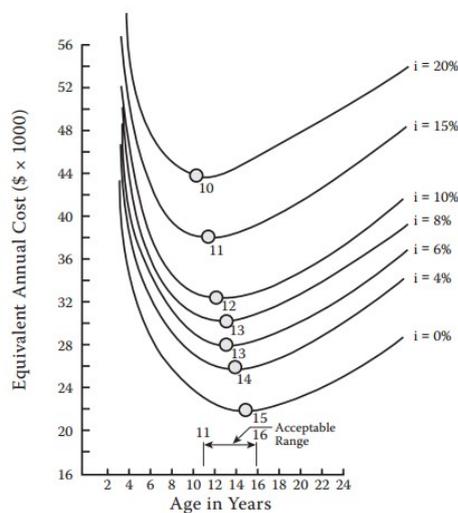


Figura 2.7 – Variação do custo anual equivalente submetido às diferentes taxas  
Fonte: Campbell, Jardine & McGlynn (2011)

De acordo com Jardine & Tsang (2013), as decisões de manutenção ou substituição de bens de capital está compreendida pela otimização de quatro aspectos. O primeiro aspecto está relacionado à análise estatística e probabilística de sistemas reparáveis que permite avaliar as políticas de reposição de componentes do sistema como maneira de definir um programa adequado de manutenções preventivas, ou resolver questões de dimensionamento de estoque de peças sobressalentes. O segundo aspecto contempla os procedimentos de inspeção com uso de processos estocásticos capazes de determinar frequências ótimas de inspeção de sistemas, análise de classes de intervalos de inspeção, manutenção baseada nas condições operacionais do sistema e a combinação entre a monitoração da saúde do sistema com a substituição por tempo de uso. O terceiro aspecto consta da análise para decisão de substituição de bens de capital por meio da avaliação da vida econômica do equipamento considerando utilização anual constante, utilização anual variável ou melhoria tecnológica do bem, fatores como comparações entre as decisões de reparo ou substituição também são desenvolvidas sob este aspecto. E, por fim, o quarto aspecto trata da requisição de recursos, a qual contempla o dimensionamento correto do equipamento, dimensionamento de oficinas de manutenção, avaliação para decisões entre alugar ou adquirir recursos e casos que podem estar relacionados a este aspecto. Para cada um dos casos, os autores desenvolvem um modelo matemático para que a otimização seja então obtida.

A Figura 2.8 apresenta o gráfico de conflito clássico da vida econômica de um equipamento presente no terceiro aspecto citado. Este avalia a otimização da função de custo total que corresponde à relação entre o custo de manutenção e operação, custo fixo e o custo de propriedade de um bem. Este modelo permite base para decisão de substituição do equipamento no tempo que minimiza o custo total ou decisão de comparação entre opções de bens que apresentem desempenhos distintos a fim de encontrar a melhor opção para a empresa.

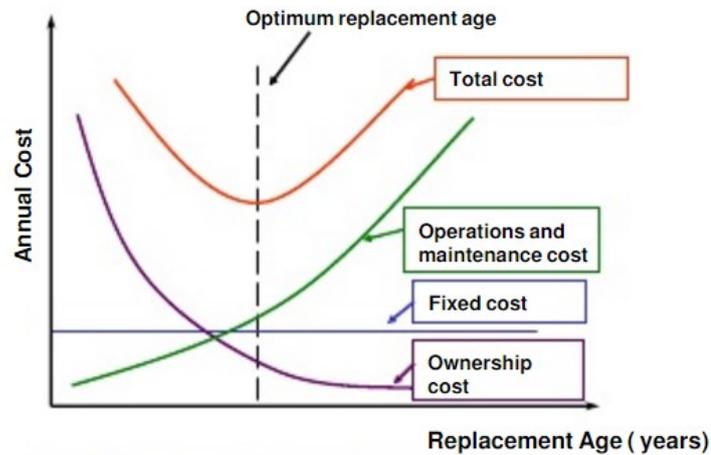


Figura 2.8 - Conflito clássico de vida econômica de equipamentos  
 Fonte: Jardine & Tsang (2013, p. 136)

A teoria de obsolescência de bens de capital desenvolvido por Jardine & Tsang (2013), presume um modelo que determina o intervalo ótimo para substituição de bens de capital que minimiza o custo total no início do período de observação, ou seja, considera-se o valor do capital no tempo  $e$ , para isso, tomam-se os custos de cada período devidamente descontados. A projeção da Equação (2.15) para ciclos infinitos indica uma progressão geométrica de razão  $r^n$ , e que de maneira geral pode ser expressa conforme Equação (2.17):

$$C(n) = \frac{\sum_{t=1}^n C_t r^t + r^n (A - S_n)}{1 - r^n} \quad (2.17)$$

Em que,

$C(n)$  é o custo total de desconto de funcionamento, a manutenção e a substituição do equipamento (por idêntico) ao longo do período de tempo;

$r$  é o fator de desconto;

$n$  é a idade em períodos do equipamento quando substituído;

$C_t$  é o custo de operação e manutenção até o  $t$ -ésimo período,  $t = 1, 2, \dots, n$ ;

$A$  é o custo de aquisição do bem de capital;

$S_n$  é o valor de revenda do equipamento no final do período de operação  $n$ .

Seja  $n$  o período ótimo para substituição do equipamento, Jardine & Tsang (2013) desenvolveram este modelo por meio de análise de ciclos de substituição infinitos. Como

limitação deste modelo, é observado que envolve apenas considerações econômicas, desconsiderando a função confiabilidade do equipamento. Além disso, o modelo não considera evoluções tecnológicas para os novos equipamentos, como também não associa a receita gerada pelo equipamento no período o qual possui grande relevância para o investidor por ser utilizado tanto para custear os gastos de manutenção e operação do equipamento quanto para custear a própria aquisição da máquina.

O fator de desconto  $r$  é obtido por meio da Equação (2.18):

$$r = \frac{1}{1 + i} \quad (2.18)$$

Christer & Scarf (1994) desenvolveram um modelo matemático de substituição de equipamentos no contexto de tecnologias médicas que associam fatores de custo e desempenho com objetivo de quantificar a penalidade de postergar o período de substituição de um equipamento. Os parâmetros utilizados no modelo são: custo esperado de operação, custo esperado de manutenção, taxa de uso do equipamento em relação ao primeiro ano; medida de penalidade; valor de revenda do equipamento antigo; custo de aquisição de equipamento novo; fator de desconto; tempo remanescente de funcionamento do equipamento antigo; vida econômica do equipamento novo; idade do equipamento existente. A deficiência do modelo apresentando está na definição dos fatores de desconto e medidas de penalidade que utilizam considerações subjetivas que dificultam quantificação.

Dos modelos abordados, observa-se a dificuldade entre a conciliação da análise econômica e a confiabilidade de equipamentos. O modelo proposto por Mellal *et al* (2013) apesar de considerar a frequência de falhas do sistema, aborda uma associação parcial de características econômicas como o custo a aquisição de novos sistemas e o custo para implantação de novos sistemas, ignorando a produtividade dos sistemas durante sua operação. Campbell, Jardine & McGlynn (2011) e Jardine & Tsang (2013) determinam como relevantes as características econômicas a fim de determinar o período ótimo para substituição dos equipamentos, desconsiderando a frequência de falhas e consequente disponibilidade dos equipamentos que impactam diretamente na receita gerada pela produtividade. Por fim, Christer & Scarf (1994) propõem um modelo de substituição de equipamentos no âmbito de tecnologias médicas de baixa e média complexidade, porém, dentre os fatores associados desconsideram a frequência de falhas ou disponibilidade do equipamento.

Sendo assim, a proposição de novo modelo matemático visa avaliar a vida econômica de equipamentos médicos intensivos em tecnologia como os custos de manutenção, custos com aquisição de novo equipamento, assim como o impacto da indisponibilidade do aparelho devido à ocorrência de falhas. Além disso, a avaliação permitirá comparar custos globais por meio do pagamento avulso mediante falha do equipamento, ou custo de manutenção a preço fixo com os contratos de manutenção.

## 3 MÉTODO

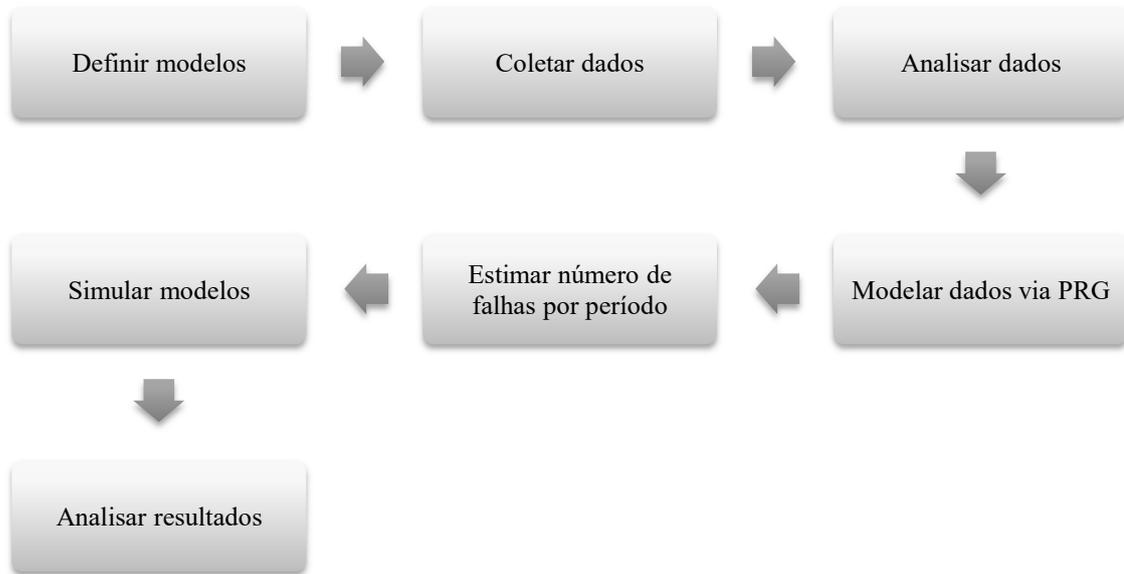
### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A área de tecnologia para a saúde tem evoluído através do desenvolvimento de máquinas e técnicas que possibilitam avanços em diagnósticos e tratamentos desde o início da civilização (DYRO, 2003). Por meio da associação do desenvolvimento das tecnologias médicas com a importância social e econômica dos equipamentos intensivos em tecnologia, existe a necessidade crescente de estudos para aperfeiçoamento de sistemas e componentes com base na confiabilidade. Contudo, observa-se certa deficiência de estudos na área de engenharia de confiabilidade com aplicação em equipamentos médicos, o que impulsionou o desenvolvimento deste trabalho.

A realidade dos EAS que utilizam verba pública como principal ou única fonte de financiamento envolve a importância da otimização no uso dos recursos a fim de garantir que os princípios da universalidade, equidade e integralidade previstas pelo SUS sejam atendidos. Equipamentos de diagnóstico e tratamentos por imagem representam uma área crítica para os EAS, visto que os custos de aquisição, manutenção e operação são bastantes elevados, assim como o incremento da reputação do EAS que possui estes recursos, juntamente com a celeridade entre o diagnóstico correto do estado de saúde do paciente e o início do tratamento, considerados como de grande importância para a gestão de saúde.

A necessidade de informações concretas para planejamento estratégico da alta gestão do complexo IMIP em relação ao investimento em equipamentos de intensiva tecnologia fomentou o desenvolvimento de um modelo probabilístico que integre parâmetros de engenharia de confiabilidade e custos, a fim de que seja possível estimar um período ótimo de reposição de equipamento de intensa tecnologia. Para que o estudo se torne viável, a metodologia de trabalho utilizada para desenvolvimento deste estudo é apresentada na Figura 3.1 em forma de fluxograma. Inicia-se com a definição do modelo matemático para que na coleta de dados, as informações captadas sejam necessárias e suficientes para o desenvolvimento da aplicação prática. A análise dos dados contempla o tratamento das informações com base nas premissas designadas para o estudo a fim de que a distribuição probabilística mais adequada diante dos dados apresente melhor ajuste de modelagem. Desta forma é necessário estimar os parâmetros da distribuição para que simulações no tempo

possam ser realizadas. A conclusão do trabalho é realizada com base nos resultados obtidos com as simulações de aplicações numéricas.



*Figura 3.1 – Fluxograma do método do trabalho  
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

### 3.2 MODELOS MATEMÁTICOS

Para o desenvolvimento dos modelos matemáticos desejados, a definição dos parâmetros que deverão compor o modelo é primordial. O conhecimento de tais parâmetros também é essencial durante a coleta de dados para que as informações obtidas sejam pertinentes à execução do trabalho.

Sendo assim, com base nos estudos publicados sobre obsolescência de equipamentos comentados na Seção 2.1.3 foram determinados os seguintes parâmetros e atributos que interferem diretamente na determinação do período ótimo para obsolescência de equipamentos:

- Custo de manutenção: custos envolvidos com manutenções em caso de ocorrência de falha no equipamento, dentro do período estimado. Calculado por período (por exemplo, por ano);
- Custo de aquisição: custo de aquisição de um equipamento novo;
- Custo de venda de equipamento: custo de revenda do equipamento;
- Dados de falhas: histórico de falhas do equipamento durante o horizonte de tempo determinado.

- Receita: valor gerado pela realização de exames.
- Lucro cessante: receita que deixa de ser gerada pela não realização de exames devido à indisponibilidade da máquina.

Tais atributos possuem grande relevância para análise de confiabilidade, disponibilidade de equipamentos e determinação do período de obsolescência de equipamentos de alto valor agregado, como será apresentada na construção dos modelos a seguir.

O primeiro modelo está baseado na avaliação econômica mencionada por Jardine & Tsang (2013) na Equação 2.17. Os demais modelos foram desenvolvidos por meio do incremento de atributos considerados relevantes para o estudo, de maneira que o quarto modelo torna-se o mais complexo e abrangente dentre os modelos propostos.

### 3.2.1 Primeiro modelo

O fluxo de caixa associado ao modelo está representado na Figura 3.2, em que  $A$  representa o custo de aquisição de um equipamento.  $S_n$  se trata do valor de revenda do equipamento.  $C_t$  representa o custo de contrato de manutenção pago no início de cada ano  $t$ , e  $n$  representa o tempo em anos para o início de um novo ciclo marcado pela substituição do equipamento. O fator de desconto  $r$  é aplicado como recurso para atualização monetária em relação ao tempo e é calculado por meio da Equação (2.18) da Seção anterior.

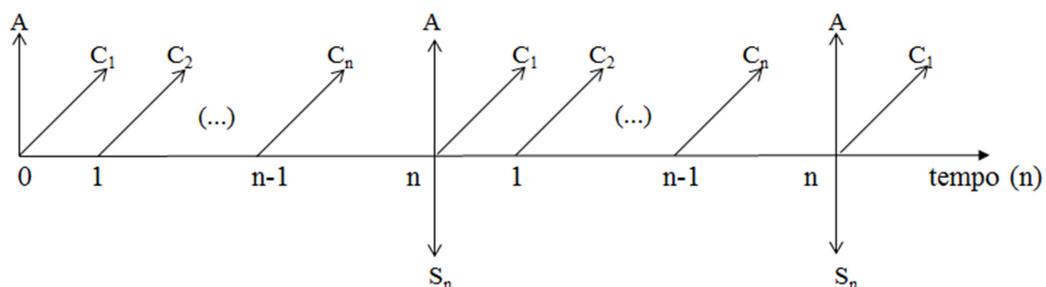


Figura 3.2 – Fluxo de caixa – primeiro modelo  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Assim, desenvolvendo os cálculos para  $n$  anos será possível obter o valor mínimo do custo total e identificar até qual ano é vantajoso economicamente manter o mesmo equipamento ou substituir por novo, tal como presente nas Equações (3.1) e (3.2):

$$C(n) = \frac{A + (\sum_{t=1}^n C_t * r^{t-1}) - S_n * r^n}{1 - r^n} \quad (3.1)$$

$$EAC = C(n) * i \quad (3.2)$$

$C(n)$  é o custo total;

$A$  é o custo de aquisição de novo equipamento;

$C_t$  é o custo de contrato de manutenção no  $t$ -ésimo período,  $t = 1, 2, \dots, n$ ;

$r$  é o fator de desconto;

$S_n$  é o valor de revenda do equipamento no final do período de operação  $n$ ;

$n$  é o tempo de operação do equipamento até ser substituído por novo.

Para este modelo, o valor de aquisição é pago no início do ciclo e o contrato de manutenção contempla mão de obra e peças ilimitadas para manutenções corretivas conforme demanda para manter o equipamento em funcionamento durante o ano  $t$ . O valor de revenda é recebido no final do período  $n$ , e é considerado como o valor depreciado do bem a uma taxa fixa, como exemplo de 10% ao ano. A taxa econômica  $i$  representa o índice de reajuste já discutido no capítulo anterior.

### 3.2.2 Segundo modelo

O segundo modelo visa associar a vida econômica do equipamento à confiabilidade do mesmo, por meio da expansão da Equação (3.1) em termos do número esperado de falhas. O custo deixa de ser contabilizado por meio dos contratos de manutenção e passa a ser dado pelo número esperado de falhas no ano a um certo custo  $C$ . Ou seja, para este modelo considera-se o valor unitário de cada manutenção, diferentemente do primeiro modelo. O fluxo de caixa é apresentado na Figura 3.3, e o modelo apresentado na Equação (3.3):

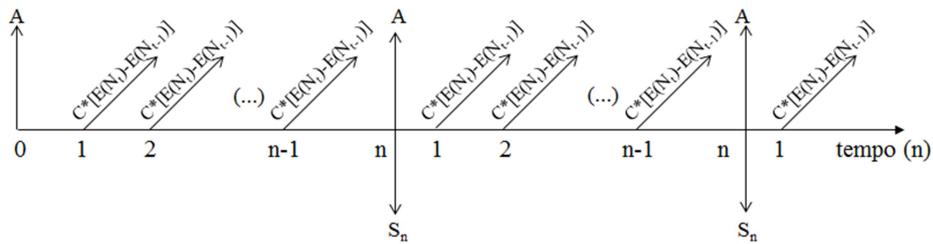


Figura 3.3 – Fluxo de caixa – segundo modelo  
 Fonte: Esta pesquisa (2017)

$$C(n) = \frac{A + (\sum_{t=1}^n C * [E(N_t) - E(N_{t-1})] * r^t) - S_n * r^n}{1 - r^n} \quad (3.3)$$

Para este modelo, as definições dos parâmetros são as seguintes:

$C(n)$  é o custo total;

$A$  é o custo de aquisição de novo equipamento;

$C_t$  é o custo de contrato de manutenção no  $t$ -ésimo período,  $t = 1, 2, \dots, n$ ;

$r$  é o fator de desconto;

$S_n$  é o valor de venda do equipamento no final do período de operação  $n$ ;

$n$  é o tempo de operação do equipamento até ser substituído por novo.

$E(N_t)$  é a quantidade de falhas estimadas até o  $t$ -ésimo período de operação,  $t = 1, 2, \dots, n$ ; e

$E(N_{t-1})$  é a quantidade de falhas estimadas até o período anterior ao  $t$ -ésimo período de operação. Considera-se  $E(N_0) = 0$ .

### 3.2.3 Terceiro modelo

O terceiro modelo proposto associa além dos parâmetros já contemplados nos modelos anteriores, a receita gerada proveniente da realização de exames e o lucro cessante que corresponde ao valor que deixa de ser gerado durante período de indisponibilidade do equipamento. A ideia do fluxo de caixa é apresentada na Figura 3.4.

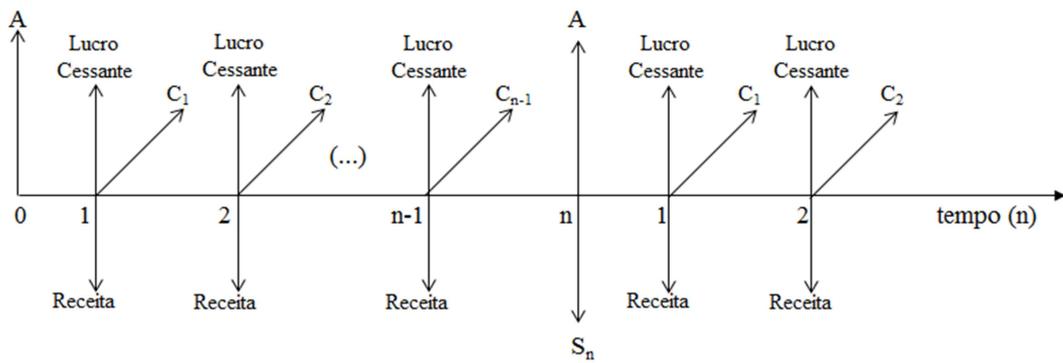


Figura 3.4 – Fluxo de caixa – terceiro modelo  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Desta maneira, obtém-se um modelo mais global que envolve mais variáveis presentes no funcionamento do equipamento. A expressão do terceiro modelo é apresentada na Equação (3.4):

$$C(n) = \frac{A + \sum_{t=1}^n (C_t * r^{t-1}) + \sum_{t=1}^n ([E(N_t) - E(N_{t-1})] * MTTR * R_m * P_t * r^t) - \sum_{t=1}^n \{ [T_{op} - [E(N_t) - E(N_{t-1})] * MTTR * R_m * P_t * r^t] - S_n * r^n \}}{1 - r^n} \quad (3.4)$$

Em que,

$C(n)$  é o custo total;

$A$  é o custo de aquisição de novo equipamento;

$C_t$  é o custo de contrato de manutenção no  $t$ -ésimo período,  $t = 1, 2, \dots, n$ ;

$r$  é o fator de desconto;

$E(N_t)$  é a quantidade de falhas estimadas até o  $t$ -ésimo período de operação,  $t = 1, 2, \dots, n$ ; e

$E(N_{t-1})$  é a quantidade de falhas estimadas até o período anterior ao  $t$ -ésimo período de operação,  $t = 1, 2, \dots, n$ . Considera-se  $E(N_0) = 0$

$MTTR$  é o tempo médio de reparo no período, em dias. (tempos de reparo são modelados por uma distribuição Exponencial);

$R_m$  é a quantidade média de exames realizados por dia;

$P_t$  é o valor pago por cada exame realizado;

$T_{op}$  é o tempo total (tempo de operação + tempo de reparo) em dias;

$S_n$  é o valor de revenda do equipamento no final do período de operação  $n$ ;

$n$  é o tempo de operação do equipamento até ser substituído por novo.

### 3.2.4 Quarto modelo

Para definição do quarto modelo proposto, o fluxo de caixa está apresentando na Figura 3.5.

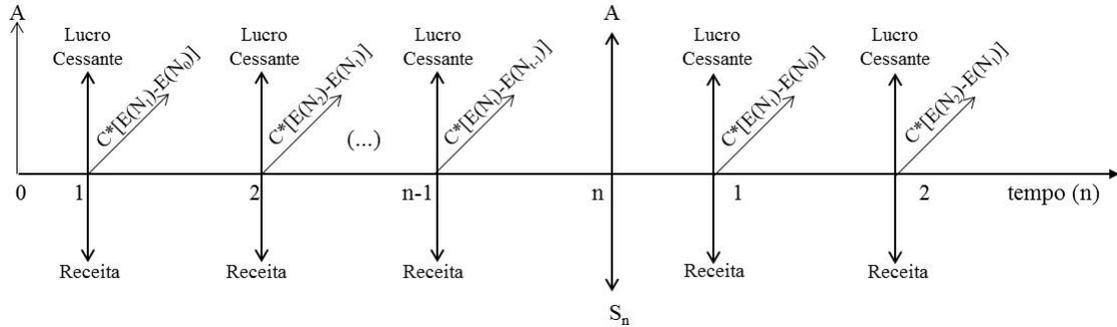


Figura 3.5 – Fluxo de caixa – quarto modelo  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Equação (3.4) pode ser utilizada para os casos de não haver um contrato de manutenção a preço fixo. Desta maneira, cada manutenção avulsa possui um custo unitário que deve ser pago de acordo com a ocorrência da falha conforme Equação (3.5), a qual resulta na Equação (3.6)

$$C_t = C * [E(N_t) - E(N_{t-1})] \quad (3.5)$$

$$C(n) = \frac{A + \sum_{t=1}^n (C * [E(N_t) - E(N_{t-1})] * r^{t-1}) + \sum_{t=1}^n ([E(N_t) - E(N_{t-1})] * MTTR * Rm * P_t * \sum_{t=1}^n \{ [T_{op} - [E(N_t) - E(N_{t-1})] * MTTR] * Rm * P_t * r^t \}) - S_n * r^n}{1 - r^n} \quad (3.6)$$

Em que,

$C(n)$  é o custo total;

$A$  é o custo de aquisição de novo equipamento;

$C_t$  é o custo de contrato de manutenção no  $t$ -ésimo período,  $t = 1, 2, \dots, n$ ;

$r$  é o fator de desconto;

$E(N_t)$  é a quantidade esperada de falhas até o  $t$ -ésimo período de operação,  $t = 1, 2, \dots, n$ ; e  $E(N_{t-1})$  é a quantidade esperada de falhas até o período anterior ao  $t$ -ésimo período de operação,  $t = 1, 2, \dots, n$ . Considera-se  $E(N_0) = 0$

$MTTR$  é o tempo médio de reparo no período, em dias. (tempos de reparo são modelados por uma distribuição Exponencial);

$R_m$  é a quantidade média de exames realizados por dia;

$P_t$  é o valor pago por cada exame realizado;

$T_{op}$  é o tempo total (tempo de operação + tempo de reparo) em dias;

$S_n$  é o valor de revenda do equipamento no final do período de operação  $n$ ;

$n$  é o tempo de operação do equipamento até ser substituído por novo.

### 3.3 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Com intuito de realizar o estudo de caso e aplicação prática do modelo desenvolvido, existe a possibilidade de acesso às informações de equipamentos médicos intensivos em tecnologia do setor de radiologia do complexo IMIP. Por se tratar de hospital escola, houve facilidade em obter os dados necessários para o desenvolvimento do estudo por meio de relatórios do sistema de gestão de equipamentos médicos do SEC da Instituição. O complexo IMIP demonstrou interesse nos resultados do estudo, visto que representa uma avaliação com fundamento científico de equipamentos considerados críticos, e que pode ser estendido para outras máquinas além da ressonância magnética.

Assim, obtidos os tempos entre falhas através dos registros do histórico de manutenções do equipamento, é possível definir a distribuição probabilística dos dados. A análise estatística descritiva irá fornecer informações iniciais básicas sobre o tempo entre falhas em relação à média, mediana, desvio padrão e variância.

Posteriormente, a modelagem em distribuição probabilística paramétrica para sistemas reparáveis deve ser realizada para que a função de distribuição acumulada condicional do PRG possa ser definida, assim como o número esperado de falhas em cada período também necessário para o desenvolvimento do estudo.

### 3.4 SIMULAÇÃO

Definido o modelo matemático a ser utilizado e com posse dos parâmetros e dados necessários, a simulação deverá ser realizada com auxílio de ferramentas computacionais, dada a existência de cálculos complexos. O *software* escolhido é o Matlab® por ser de programação acessível e robustez necessária e suficiente para fornecer resultados desejados. O sistema Microsoft Excel® também deverá ser utilizado como complemento e organização de dados.

Por meio do histórico de tempo entre falhas do equipamento, é possível estimar os parâmetros da função de distribuição de probabilidade utilizando o método de estimadores de máxima verossimilhança, conforme apresentado na Seção 2.2.4. A fim de obter esses resultados, é aplicado o método PSO.

Para o horizonte de tempo de observação, a variável de interesse para estimar o número de falhas é obtida através da função distribuição de probabilidade acumulada condicional do tempo entre falhas, resolvida para  $t_i$  (Equação 2.3). Através de interações sucessivas, a simulação de Monte Carlo gera números aleatórios entre 0 e 1 para função distribuição acumulada  $F(t_i)$ , com  $t_i$  sendo o período real de ocorrência da falha. Então, sendo  $m$  a quantidade de iterações aleatórias de Monte Carlo e  $n_j$  sendo o número de falhas registradas, a quantidade estimada de falhas no período  $t_i$  é dada pela Equação (3.7), de forma que os resultados dessas iterações sucessivas fornecerão uma média válida estatisticamente que será utilizada para o cálculo de  $C(n)$ . (YAÑEZ, JOGLAR & MODARRES, 2002).

$$E[N(t_i)] = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{m} \quad (3.7)$$

### 3.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Visando ao objetivo geral do trabalho com definição de um período ótimo de substituição de equipamento intensivo em tecnologia, estima-se obter um ponto de mínimo para as funções  $C(n)$  definidas na Seção 3.2 por uma escolha de  $n$  ou ainda o ponto  $n$  que anule  $C(n)$  – indicando o momento em que se passa a ter custo e não lucro com o equipamento. Outras avaliações de desempenho da máquina podem ser realizadas a fim de observar a situação atual do equipamento e a taxa de degradação do mesmo considerando o histórico de falhas.

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 INSTITUTO DE MEDICINA INTEGRAL PROFESSOR FERNANDO FIGUEIRA - IMIP

Fundado em 1960 e em constante evolução, o Complexo Hospitalar IMIP, situado em Recife/PE, é uma entidade filantrópica e é visto como centro de referência em assistência à saúde em nível nacional e internacional. O conceito de sua fundação eram assistência e ensino de medicina infantil. Hoje, é classificado como hospital geral desenvolvido sobre os pilares de assistência médico-social, ensino, pesquisa em saúde e extensão comunitária. O IMIP presta serviços exclusivamente ao Sistema Único de Saúde (SUS), dispõe de 1.066 leitos, 21 salas de centro cirúrgico e 101 leitos de Unidade de Tratamento Intensivo (UTI), distribuídos em dez prédios construídos em 69mil m<sup>2</sup>, o que torna cada dia um novo desafio para as áreas de assistência, gestão em saúde e apoio do complexo que buscam garantir a prestação de um serviço digno e humanizado para a sociedade carente. (fonte: <http://www1.imip.org.br/imip/numeros/index.html>).

A importância social do Complexo IMIP em relação ao grupo de procedimentos com finalidade diagnóstica está apresentada na Figura 4.1, com o gráfico evolutivo de procedimentos realizados no período de 2008 a 2015. Em números, o IMIP realiza em média 7% de todos os procedimentos com finalidade diagnóstica da Região Metropolitana do Recife. O que representa um montante de 7.770.370 procedimentos realizados e uma média anual de 971.296. O maior número de exames no período de 2008 a 2015 ocorreu no ano de 2014 com a realização de 1.555.501 exames. Em 2015, a quantidade de exames foi ligeiramente menor, 1.553.547.

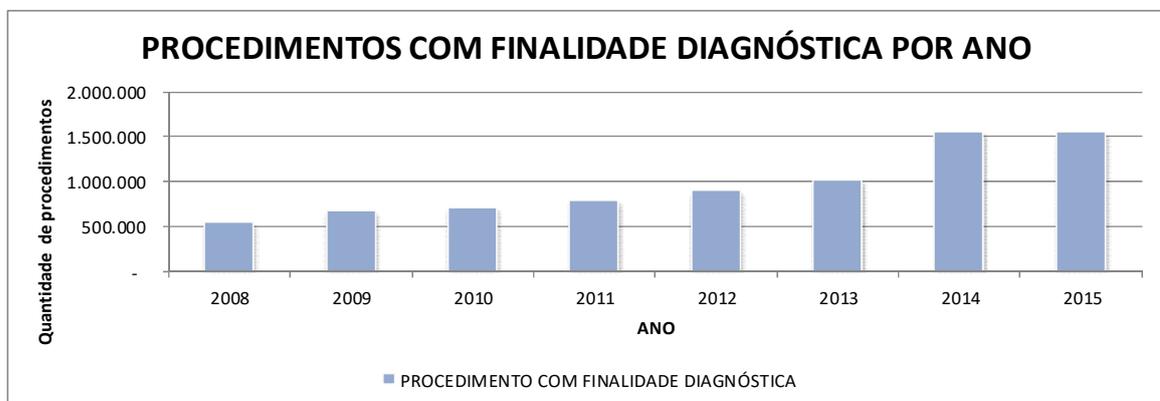


Figura 4.1 – Evolução de realização de procedimentos com finalidade diagnóstica realizados pelo IMIP no período de 2008 a 2015

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Ao longo de sua existência, o complexo IMIP busca oferecer tratamento de qualidade à população que recorre ao SUS, o que impele a preocupação contínua em avaliação da tecnologia em saúde a fim de promover melhoria através da atualização das máquinas, dos processos e dos profissionais. Atualmente o IMIP conta com um parque de mais de 6.000 equipamentos médicos, sendo 57 utilizados para os procedimentos com finalidade de diagnóstico por imagem. A Figura 4.2 representa a evolução de realização por tipo de procedimentos diagnósticos durante o período de 2010 a 2015. O crescimento significativo dos exames de radiologia e ultrassonografia ocorre devido ao incremento da quantidade de máquinas disponíveis para realização dos exames ao longo dos anos, atingindo o índice de 58.154 exames de radiologia realizados no ano de 2015, mantendo uma média de 52.796,3 procedimentos ao ano. Os procedimentos de diagnóstico por ultrassom seguem uma média de 47.931,5 procedimentos por ano atingindo um índice máximo no ano de 2014 com 58.204 procedimentos realizados. Os procedimentos por tomografia seguem uma média de 9.701,8 exames por ano, no mesmo período de observação. Os procedimentos por medicina *nuclear in vivo* registram uma média anual de 5.367,5 procedimentos para o mesmo período, com índice máximo atingido em 2015 com a realização de 7.643 procedimentos, o que representa 45% dos procedimentos realizados no estado de Pernambuco para o mesmo ano. Obedecendo ao princípio de transparência do SUS, todos estes dados estão disponíveis para consulta pública através do *site* [tabnet.saude.pe.gov.br](http://tabnet.saude.pe.gov.br).

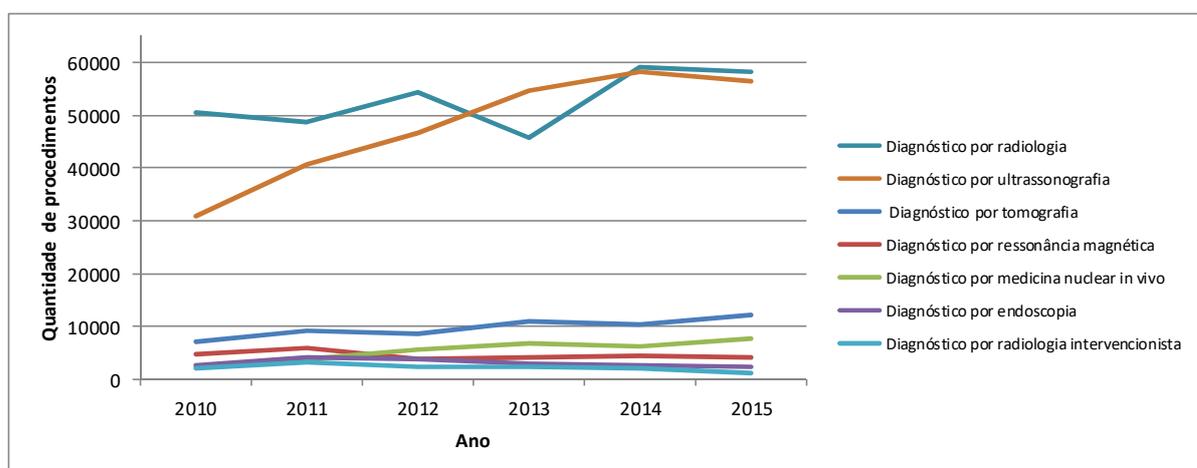


Figura 4.2 – Quantidade de procedimentos por subgrupo com finalidade diagnóstica realizada pelo IMIP no período de 2010 a 2015

Fonte: Este trabalho (2017)

No setor de radiologia, os aparelhos de ressonância magnética, tomografia e ultrassom somam 82% da receita gerada pelo setor. Com média anual de 4.234 exames, a ressonância magnética representa 15% de todos os exames de ressonância realizados no Estado de Pernambuco pelo SUS. A Figura 4.3 diagrama a evolução da quantidade de procedimentos de diagnóstico por ressonância magnética realizados pelo IMIP no período de 2008 a 2015, a qual atinge máximo valor em 2010 com 5.918 exames.

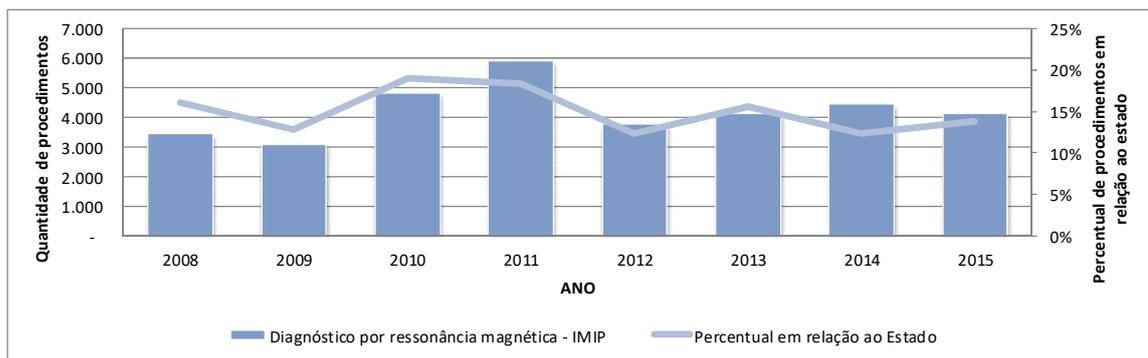


Figura 4.3 – Quantidade de procedimentos de ressonância magnética realizada pelo IMIP no período de 2008 a 2015, com comparação ao percentual em relação aos exames do estado de PE.

Fonte: Este trabalho (2017)

Diante do exposto, acrescido ao grande impacto social, importância e benefícios que os exames e tratamentos por imagem proporcionam aos pacientes, associado ao alto investimento para aquisição dos equipamentos, elevados custos em contratos de manutenção e aquisição de peças para conserto dos aparelhos e parcela significativa de retorno financeiro para a Instituição, a área de equipamentos de imagem foi categorizada como crítica pela administração do complexo. Sendo assim, foi designada como área alvo das pesquisas deste estudo.

## 4.2 MECANISMOS E MODOS DE FALHAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Os métodos de imagem por ressonância nuclear magnética (RNM) são baseados na absorção e emissão de energia na banda de radiofrequência (RF) pelo núcleo das partículas atômicas que compõem o corpo. Através da relação entre a frequência na qual os átomos conseguem absorver energia de rotação (frequência de ressonância) e o campo magnético ao qual estão submetidas, as partículas nucleares podem ser observadas para gerar imagens,

como método seguro e não invasivo. Sendo o corpo humano composto por 63% de hidrogênio, este se torna o principal elemento para ser mapeado em imagem por RNM. Por tal razão, esta técnica gera imagens de alta qualidade em tecidos moles e permite uma resolução de contraste necessária e suficiente para realização de análise funcional de órgãos. Desta forma, para geração de uma imagem por RNM inicia-se pela aplicação de um campo magnético para magnetização nos núcleos dos átomos, seguindo com aplicação de pulsos de RF para promover a perturbação dos núcleos que irão gerar uma energia que possa então ser detectada, captada, processada e registrada para que ocorra então a análise dos médicos e especialistas.

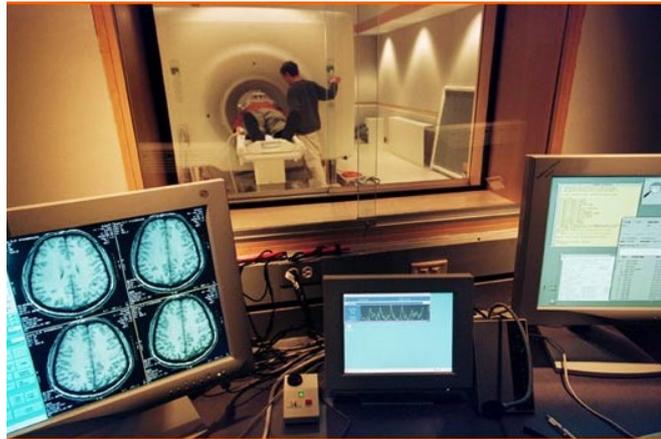
A estrutura necessária para instalação e funcionamento de um aparelho de RNM é complexa e delicada. Na Figura 4.4 está a imagem da sala de exames que é composta pela parte principal do equipamento com a mesa do paciente, o *gantry* com o magneto, a bobina de gradiente e as bobinas de RF. O magneto é uma grande bobina que precisa ser refrigerada com hélio líquido a fim de manter suas características supercondutoras. Para cada tipo de exame são utilizadas bobinas de RF que geram campos magnéticos na frequência específica da região que se deseja observar.



*Figura 4.4 – Sala de exames de Ressonância Magnética  
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Além da sala de exames, há a sala de comando e sala técnica. Na sala de comando, o técnico em radiologia aciona os controles da máquina para realização dos exames, e fica alocado o computador para visualização das imagens. O técnico deve manter contato visual

constante com o paciente a fim de intervir em caso de necessidade, conforme exemplo na Figura 4.5. Na sala técnica está a fonte de RF, o sistema de amplificação de sinal RF, sistema de digitalização, detecção de imagem, programador de pulsos de perturbação, compressor de líquido refrigerado, quadro geral de distribuição de energia, estabilizador de tensão, entre outras peças e sistemas necessários para o funcionamento da máquina de RNM.



*Figura 4.5 - Sala de comando de Ressonância Magnética  
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Além das partes principais mencionadas, outros acessórios compõem a estrutura para perfeito funcionamento de um aparelho deste tipo. A gaiola de Faraday deve ser dimensionada a fim de garantir que o ambiente externo à sala de exames nem cause interferência nem seja afetado pelo campo magnético gerado pela máquina. O sistema de refrigeração dos ambientes é de extrema importância, visto que todos os componentes possuem proteção de funcionamento contra sobreaquecimento.

Diante deste arranjo complexo de componentes, a compreensão da estrutura e funcionamento é inevitável para identificação dos modos de falhas do sistema, como por exemplo: presença de artefatos e ruídos após reconstrução das imagens, o baixo nível de hélio líquido, problemas de *software* e configuração do sistema, falhas no amplificador de RF, falha no compressor responsável pelo resfriamento do hélio líquido, desgaste na conexão das bobinas de crânio, cardíaca e *sense body*, desgaste dos cabos elétricos e de comunicação de dados. Pode ocorrer também o desgaste das placas de controle que são afetadas diretamente por picos e falta de energia elétrica, variações de temperatura e umidade na sala de exame e sala de controle que podem ocasionar superaquecimento ou condensação das placas eletrônicas e consequentes paradas do sistema.

### 4.3 DADOS

Os dados de falhas do equipamento de RNM do complexo IMIP foram fornecidos pelo SEC da instituição e foram coletados de um *software* de gerenciamento de tecnologias médicas chamado Dínamus®. Através deste *software* é possível gerenciar todas as manutenções e intercorrências no parque de equipamentos médicos instalados no IMIP, realizar estudos de disponibilidade, avaliação do ciclo de vida de equipamento específico ou grupos de equipamentos, análise de custos com manutenções, gerenciamento de contratos de manutenção em equipamentos médicos e diversas outras análises pertinentes ao SEC.

Para informações de custo de aquisição de equipamento novo e valor de venda do equipamento antigo foi realizada pesquisa de mercado com fabricantes deste tipo de equipamento. Dados sobre quantidade de procedimentos realizados por período pelo IMIP e pelo Estado de Pernambuco foram coletados através do site disponibilizado pela Secretaria de Saúde do Estado de Pernambuco (SES/PE) para consulta pública.

A fim de seguir com o estudo, foram tomadas algumas premissas:

- Não foram consideradas as manutenções preventivas, visto que são programadas com antecedência;
- Foram consideradas falhas que acarretam impacto no funcionamento do equipamento, seja com parada total ou parcial da máquina;

O horizonte de tempo para aquisição de dados deste estudo é de 8 anos, que corresponde ao período de 2008 a 2015. A máquina foi submetida a 66 falhas e o tempo entre falhas, em dias, é apresentado na Tabela 4.1. A primeira falha do equipamento ocorreu 99 dias após o início do funcionamento da máquina, e a 66ª falha foi registrada no dia 2.833.

Tabela 4.1 – Tempo entre falhas

Número da falha	Tempo entre falhas	Número da falha	Tempo entre falhas	Número da falha	Tempo entre falhas	Número da falha	Tempo entre falhas
1	99	18	24	35	53	52	18
2	38	19	66	36	14	53	3
3	109	20	25	37	35	54	46
4	10	21	4	38	73	55	17
5	35	22	8	39	18	56	7
6	42	23	26	40	38	57	75
7	31	24	98	41	140	58	58
8	18	25	11	42	19	59	102
9	53	26	87	43	10	60	6
10	3	27	11	44	17	61	53
11	12	28	54	45	4	62	47
12	13	29	22	46	54	63	26
13	40	30	13	47	26	64	87
14	6	31	54	48	135	65	6
15	78	32	19	49	44	66	13
16	77	33	47	50	59		
17	272	34	14	51	11		

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Uma análise estatística dos tempos entre falhas pode ser utilizada para fins da inferência dos dados. A amostra possui uma amplitude de 269 dias, sendo o valor mínimo de 3 dias e o valor máximo de 272 dias para ocorrer uma falha após ocorrida a falha anterior. O tempo médio entre as falhas é de 42,92 dias, e a mediana da amostra é de 28,5. Esta diferença implica assimetria dos dados. A amostra possui um desvio padrão de 43,74 com variância da amostra de 1.913,39, que indica uma alta variabilidade dos dados em relação à média. A tabela 4.2 apresenta o resumo da estatística descritiva dos dados observados.

Tabela 4.2 – Estatística descritiva dos tempos entre falhas

<b>Média</b>	42,92
<b>Mediana</b>	28,50
<b>Modo</b>	18,00
<b>Desvio padrão</b>	43,74
<b>Variância da amostra</b>	1.913,39
<b>Amplitude</b>	269,00
<b>Mínimo</b>	3,00
<b>Máximo</b>	272,00
<b>Soma</b>	2.833,00

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Diante dos aspectos observados na Seção 2.2.4, é razoável assumir uma máquina de RNM como um sistema complexo reparável, onde os tempos entre falhas representam dados

estocásticos contínuos. Assim, assumindo uma distribuição probabilística para modelagem por meio da distribuição Weibull com processo de renovação generalizado, utilizando o método de máxima verossimilhança com PSO, os parâmetros estimados são dados pela média dos resultados de 30 repetições do algoritmo, sendo:  $\hat{\alpha} = 74.9847$ ,  $\hat{\beta} = 1.1536$  e  $\hat{\eta} = 0,9999$ . O valor de  $\hat{\beta} > 1$  admite uma taxa de falhas crescente, porém a proximidade de 1 indica um crescimento lento. Com o valor de  $\hat{\eta}$  aproximadamente 1, é possível assumir que a máquina é submetida a reparo mínimo, ou seja, as manutenções retornam o equipamento a uma situação de funcionamento a um estado de tão ruim quanto antes da ocorrência da falha, sem melhorias no desempenho do equipamento.

A partir destes parâmetros estimados, aplicando a simulação de Monte Carlo para geração de número de falhas nos pontos de falhas reais, conforme apresentado na Equação (2.3), é possível obter o número estimado de falhas para o horizonte de observação de tempo em 2.833 dias. A Figura 4.6 apresenta o número de falhas (real)  $N(t)$  e o número estimado de falhas  $E[N(t)]$ . Os resultados aproximados indicam um modelo bem ajustado se comparado aos dados de falhas do equipamento.

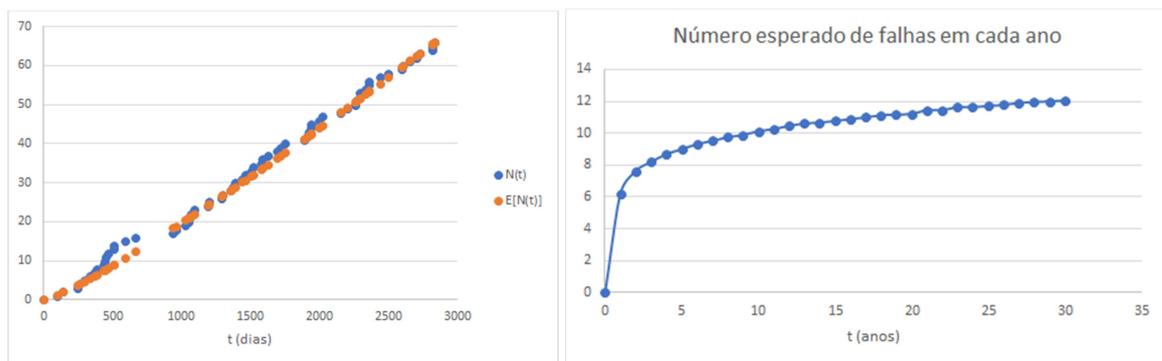


Figura 4.6 – Número estimado de falhas em relação ao número real (esquerda) e número esperado de falhas por ano (direita)

Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Figura 4.7 representa a evolução do custo de contrato de manutenção da máquina. No primeiro ano de instalação, o equipamento opera em regime de garantia de compra pelo fornecedor, ou seja, os serviços e peças necessários para manter a máquina disponível para uso são custeados pelo fabricante durante o primeiro ano de vida do aparelho. Após 12 meses da data de instalação, é firmado um contrato de manutenção com o fabricante, o qual é negociado valor fixo durante período de 12 meses. Para este estudo, o valor do contrato para o primeiro ano após término de garantia do fabricante é de R\$ 175.592,48. Ao fim deste

período, deve existir uma nova negociação para renovação de contrato para o ano seguinte. Sendo o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) o índice de reajuste para todos os contratos aplicados pela instituição, considera-se a hipótese de que os valores de contrato de manutenção posteriores a 2015 são estimados com a taxa de 7,7818% que corresponde à média dos índices registrados no período de 2008 a 2015.



*Figura 4.7 – Custo de manutenção  
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

O custo de aquisição da máquina em 2008 foi de R\$ 3.555.400,00. Para o valor de revenda do equipamento, é necessário considerar a depreciação do bem. Segundo Santos (2015), o ciclo de vida deste tipo de equipamento é de 10 anos, o que corresponde a uma taxa de depreciação de 10% ao ano.

#### 4.4 RESULTADOS

A primeira análise realizada com os dados observados na Seção 4.3 trata-se da avaliação sob os aspectos de investimentos econômicos com o equipamento, conforme discussão da Seção 3.2.1. A Tabela 4.3 apresenta os valores aplicados no primeiro modelo para a simulação numérica.

*Tabela 4.3 – Parâmetros do primeiro modelo*

Parâmetro	1º modelo
$A$	R\$ 3.555.400,00
$r$	0,9278
$i$	7,7818%
$S_n$	10% a.a.

Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Figura 4.8 representa o EAC como sendo o fator resultante da operação entre as funções de custo de manutenção, custo de aquisição e valor de revenda do equipamento. O custo com manutenção é uma função monotônica não decrescente com o tempo conforme apresentando na Figura 4.7, devido a reajustes de contratos de manutenção. O valor de revenda é uma função linear decrescente por causa da depreciação constante do valor do equipamento ao longo dos anos.

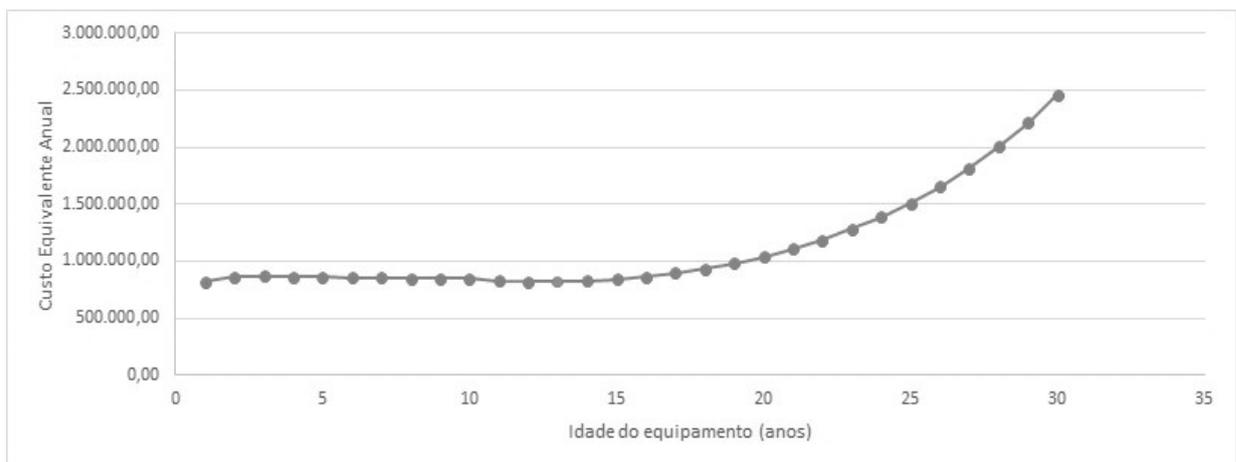


Figura 4.8 – Resultado Primeiro Modelo – Custo equivalente anual  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Desta análise, resulta que a função atinge o ponto de mínimo quando a máquina completa 13 anos de funcionamento, sendo este o período ótimo para substituição do equipamento por meio da análise de vida econômica do bem submetido ao regime de contrato de manutenção com valor fixo ao ano. Na Tabela 4.4 estão dispostos os valores numéricos praticados no segundo modelo.

Tabela 4.4 – Parâmetros do segundo modelo

Parâmetro	2º modelo
$A$	R\$ 3.555.400,00
$R$	0,9278
$I$	7,7818%

$S_n$	10% a.a.
$C$	R\$ 18.300,00

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O resultado do segundo modelo é apresentado na Figura 4.9, em que considera os parâmetros apresentados na Seção 3.2.2. O custo  $C$  de cada manutenção avulsa foi estimado por meio de pesquisa de mercado e contempla a média do valor da mão de obra necessária para cada atendimento e a média do valor das peças que foram substituídas no período de 2008 a 2015, resultando num custo de R\$ 18.300,00 por cada manutenção. O valor elevado é condizente com a realidade visto que representa uma média entre as manutenções que não necessitaram de peças e as manutenções que necessitaram de peças bem onerosas.

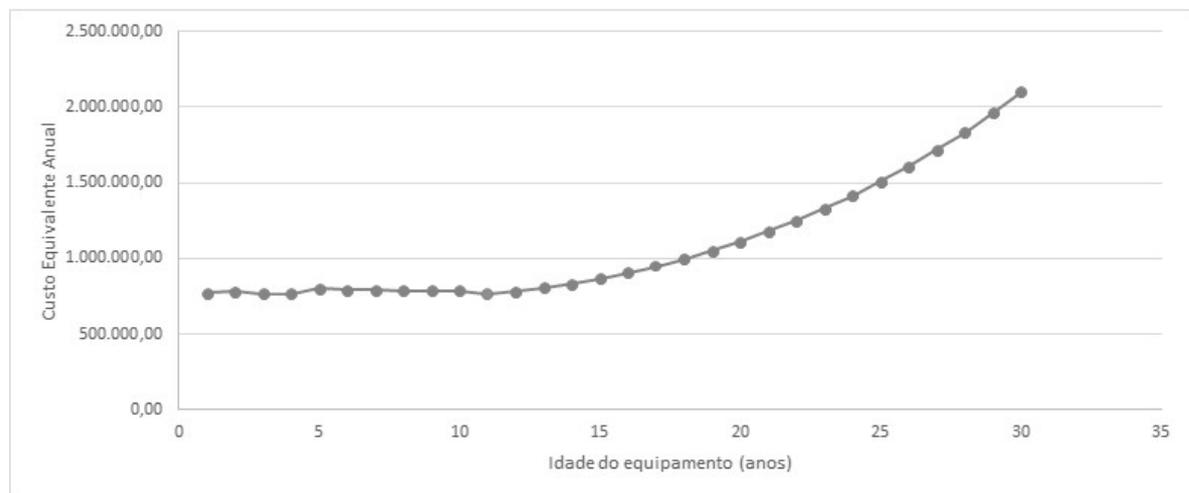


Figura 4.9 – Resultado Segundo Modelo – Custo equivalente anual

Fonte: Esta pesquisa (2017)

De acordo com a função, o ponto de mínimo é atingido no 11º ano do equipamento, sendo este o período ótimo de obsolescência do equipamento por meio da análise da vida econômica do bem associado à confiabilidade do mesmo segundo histórico de falhas.

Visto que o primeiro e segundo modelos apresentam parâmetros similares, é possível realizar uma comparação. Apesar do período de obsolescência estimado admitindo o regime de contrato de manutenção ser superior em relação ao período estimado para equipamento sem contrato de manutenção, os custos totais e equivalentes envolvidos também são superiores na maior parte do período de observação, ou seja, é mais oneroso manter um equipamento com contrato de manutenção a preço fixo do que pagando a manutenção avulsa conforme demanda. A comparação pode ser observada na Figura 4.10.

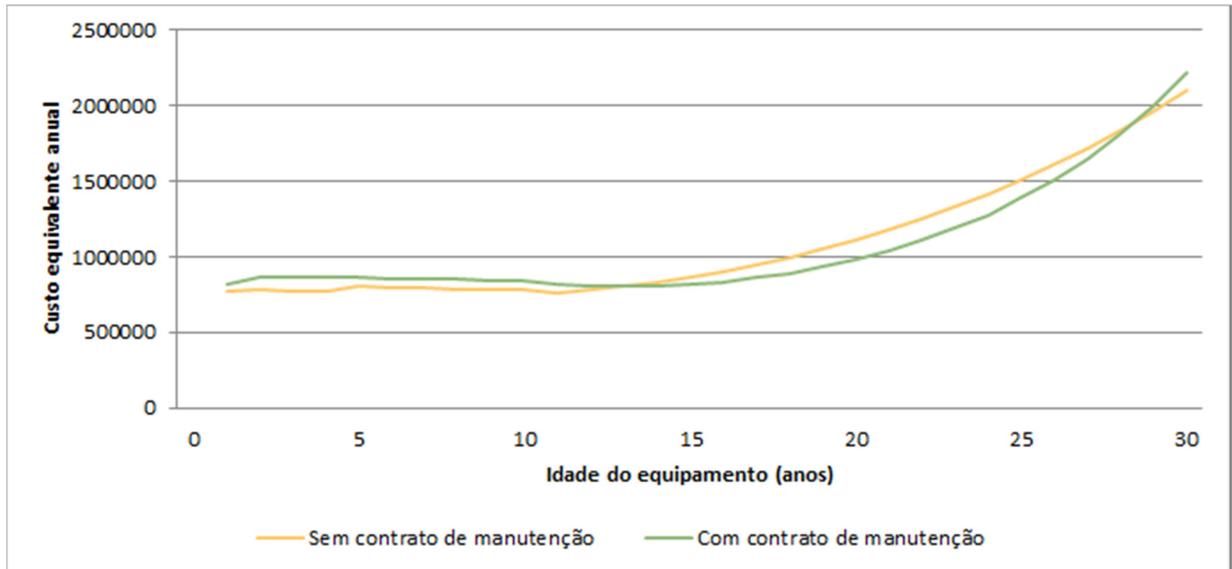


Figura 4.10 – Comparação de custos com e sem contrato de manutenção  
 Fonte: Esta pesquisa (2017)

Entre o período de início de funcionamento e o 13º ano do equipamento, os custos equivalentes totais com contratos de manutenção superam em média 8% os custos com manutenções e peças avulsas. No período do 14º ao 28º ano, o custo com manutenções avulsas supera os custos com contratos de manutenção em média 8%, e após o 29º ano os custos com contratos de manutenção a preço fixo ascendem abruptamente. Em média, no período de 30 anos, os custos equivalentes anuais com contratos de manutenção são 1% superiores aos custos com manutenções avulsas.

Ou seja, como consequência deste resultado, observamos que os custos, ao longo do tempo, de equipamentos submetidos ao regime de contratos de manutenção com fornecimento de peças são significativamente superiores aos custos com pagamento de manutenção na ocorrência da falha. Para o terceiro modelo, os parâmetros estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros do terceiro modelo

Parâmetro	3º Modelo
$A$	R\$ 3.555.400,00
$r$	0,9278
$i$	7,7818%
$S_n$	10% a.a.
$MTTR$	7,5 dias
$R_m$	16
$P_t$	R\$ 268,00
$T_{op}$	365 dias

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Consideram-se não apenas os custos e gastos com manutenção do equipamento, como também as receitas geradas pelo seu funcionamento. Desta maneira, o custo equivalente anual negativo representa lucro com o equipamento, ou seja, período em que a receita supera a despesa. O ponto de transição do custo negativo para o positivo equivale ao ponto em que as despesas passam a superar a receita, sendo este o período ótimo para substituir o equipamento antigo por um novo. A Figura 4.11 indica o 20º ano do equipamento como sendo este ponto de transição.

O cálculo da disponibilidade do equipamento considera o *MTTR*, que com base no histórico de manutenções é de 7,5 dias. Multiplicando o *MTTR* pelo número estimado de falhas no período fornecerá a quantidade de dias que o equipamento estará indisponível para uso. O tempo total de operação da máquina foi estimado em  $T_{op} = 365$  dias, visto que exames são realizados todos os dias da semana. Foram considerados  $R_m = 16$  procedimentos por dia para obter a receita gerada quando o equipamento encontra-se em funcionamento e o lucro cessante do equipamento quando parado.

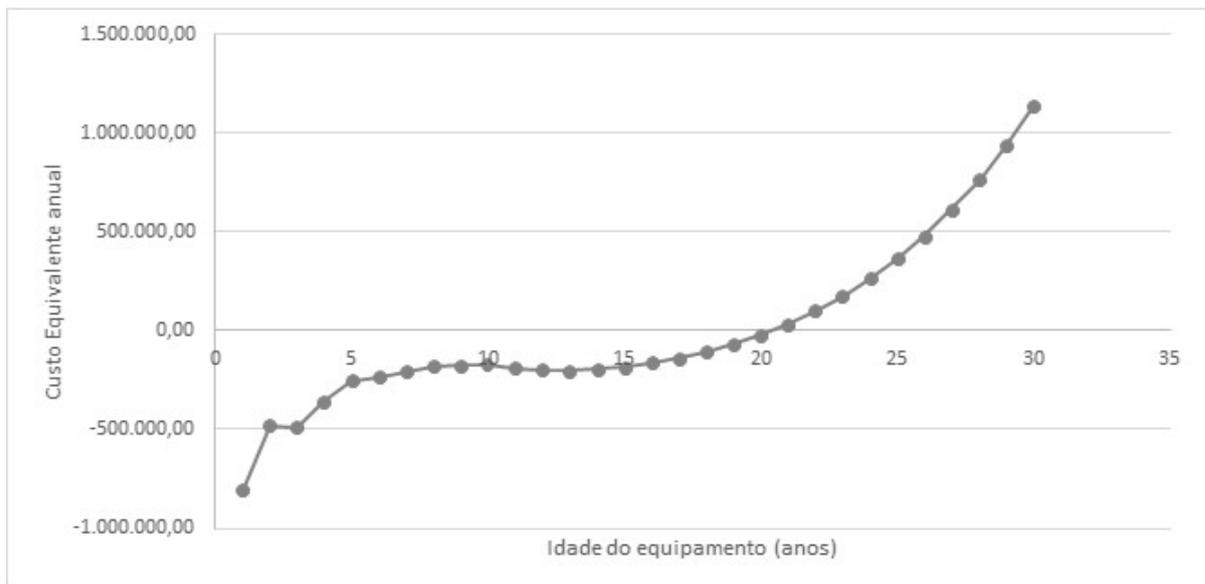


Figura 4.11 – Resultado terceiro modelo – Custo equivalente anual  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Assim, é viável permanecer com o mesmo equipamento até o 20º ano de uso, onde a partir deste período os gastos com manutenção tornam-se ainda maiores associados ao aumento do lucro cessante. A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros aplicados no quarto modelo.

Tabela 4.6 – Parâmetros do quarto modelo

Parâmetro	3º Modelo
$A$	R\$ 3.555.400,00
$r$	0,9278
$i$	7,7818%
$S_n$	10% a.a.
$MTTR$	7,5 dias
$R_m$	16
$P_t$	R\$ 268,00
$T_{op}$	365 dias
$C$	R\$ 18.300,00

Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Figura 4.12 mostra o resultado do quarto modelo que aplica a mesma análise para equipamentos em regime de pagamento de manutenção avulsa e peças na ocorrência de falha, o período de obsolescência do equipamento é de 17 anos, ou seja, é viável economicamente permanecer com este equipamento neste regime até o 17º ano de uso do aparelho.

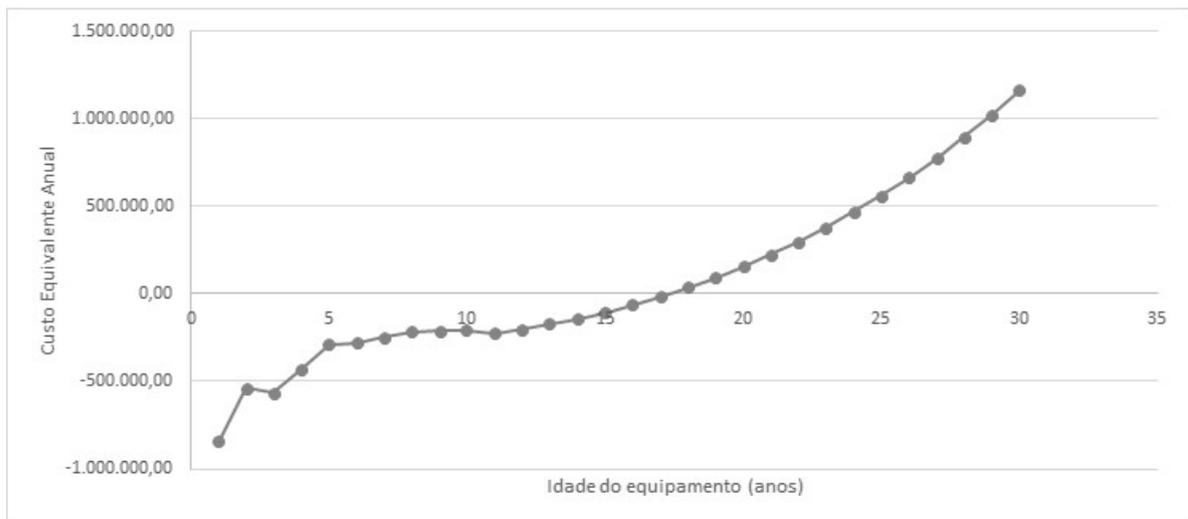


Figura 4.12 – Resultado Quarto modelo – Custo equivalente anual

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Uma comparação entre o terceiro e o quarto modelo indica que os lucros com equipamento sem contrato de manutenção são superiores desde a instalação até o 12º ano. A Figura 4.13 representa graficamente a comparação entre os dois regimes.

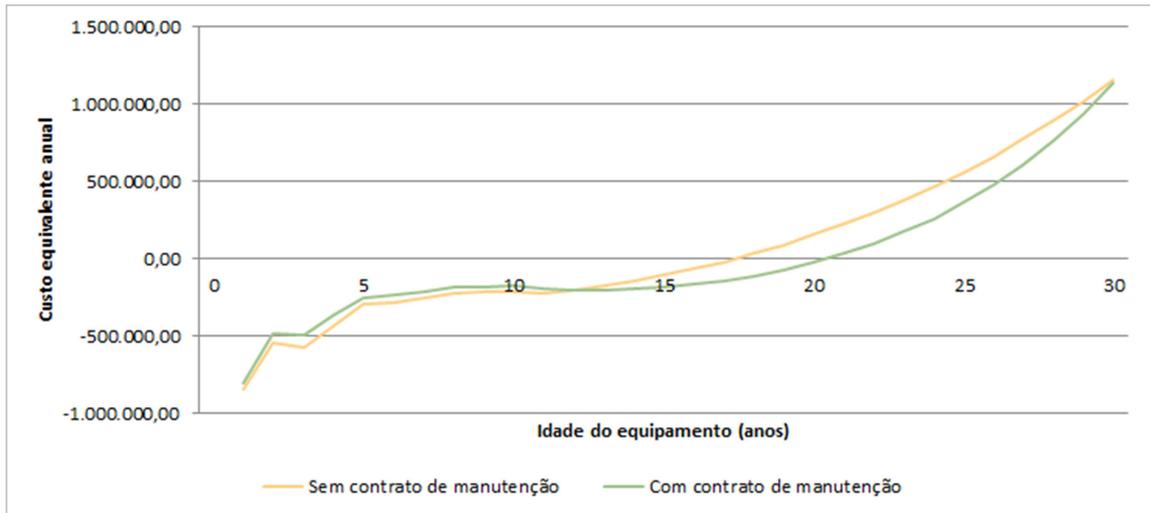


Figura 4.13 – Comparação terceiro e quarto modelos  
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Como resumo entre os modelos propostos e resultados obtidos, a Tabela 4.7 apresenta os principais atributos considerados em cada modelo e os resultados obtidos com a aplicação numérica.

Tabela 4.7 – Resumo dos atributos e resultados obtidos por modelo

Modelo	Principais atributos	Resultado
1º Modelo	- Custo de aquisição - Custo de contrato de manutenção - Custo de revenda	13 anos
2º Modelo	- Custo de aquisição - Custo de manutenção avulsa - Número de falhas - Custo de revenda	11 anos
3º Modelo	- Custo de aquisição - Custo de contrato de manutenção - Receita gerada - Lucro cessante por máquina parada - Custo de revenda	20 anos
4º Modelo	- Custo de aquisição - Custo de manutenção avulsa - Número de falhas - Receita gerada - Lucro cessante por máquina parada - Custo de revenda	17 anos

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Os resultados distintos entre os modelos presumem a influência que os atributos exercem na avaliação das tecnologias, de maneira que cada situação deve ser discutida de acordo com sua especificidade.

Para a máquina de RNM em questão, o resultado do primeiro modelo aproxima-se do tempo de vida útil estimado pelo próprio fabricante. De acordo com o fabricante, a partir do ano 2020 as peças de reposição para este modelo de equipamento não terão fornecimento garantido, de maneira que os contratos de manutenção apenas contemplarão serviços de mão de obra, e as peças deverão ser adquiridas de maneira avulsa conforme disponibilidade em estoque.

Contudo, a associação de atributos factíveis no quarto modelo, o qual considera não apenas os custos com contratos de manutenção, mas também as receitas geradas pela produtividade da máquina, que devem ser utilizadas como maneira de subsistência do serviço, confirma que um EMH intensivo em tecnologia pode exceder as expectativas do fabricante mantendo-se viável até os 17 anos de uso. A prática mercadológica de limitação de produção por modelo de equipamento apresenta-se como forma de induzir a renovação de parque instalado por parte do fabricante, porém não há indícios de indisponibilidade de peças para fornecimento avulso após o final de vida útil designado pelo fabricante. Peças de uso comum tendem a ser adaptadas entre modelos de gerações distintas entre os equipamentos de maneira que equipamentos intensivos em tecnologia da área médica conseguem se manter em perfeito funcionamento após o período de *end of life* suposto pelos fabricantes.

## 5 CONCLUSÕES

A avaliação do ciclo de vida de bens de capital tem ganhado importância nas decisões estratégicas para alta administração das empresas. Observar até quando se torna viável manter o mesmo equipamento em funcionamento por meio de investimento em manutenção e reposição de peças ou optar pela substituição completa do equipamento por um novo requer uma análise da interação entre parâmetros, dados e informações, visto que a ordem de grandeza destes investimentos pode superar milhões de reais.

Para a área de equipamentos médico-hospitalares, a escassez de estudos científicos sobre análise de obsolescência para equipamentos intensivos em tecnologia e que associem fatores econômicos às questões de confiabilidade incentivou o desenvolvimento deste trabalho. Os estudos de determinação do período de substituição de bens de capital serviram como principal apoio para o desenvolvimento dos modelos matemáticos que foram utilizados como base para este estudo.

O acesso aos dados de equipamento de RNM de um importante Hospital da região metropolitana do Recife/PE permitiu aplicação prática dos modelos matemáticos desenvolvidos. Por meio do histórico de falhas da máquina foi possível determinar a função de distribuição acumulada condicional por meio do método de estimação por máxima verossimilhança com otimização por nuvem de partículas. A estimativa do parâmetro  $\beta$  presume uma taxa de falhas crescente, enquanto que o valor estimado do parâmetro  $q$  indica que o equipamento foi submetido ao regime de reparo mínimo pelo fabricante durante o período de coleta de dados.

Desta forma, por meio do primeiro modelo proposto realizando uma análise econômica sobre os custos descontados totais oriundos dos gastos com investimento na aquisição do equipamento, valor de revenda do equipamento no final do ciclo, e gastos com manutenções oriundas de contratos de manutenção, é justificável permanecer com a máquina antiga até o 13º ano de vida, pois a função de custos descontados totais atinge valor mínimo neste período.

O segundo modelo presume que se ao invés de manter um contrato a preço fixo as manutenções forem pagas apenas na ocorrência de cada falha, ou seja, associando a função econômica à função confiabilidade do equipamento, o período o qual é justificável permanecer com a máquina antiga é de 11 anos. Apesar de o período de tempo obtido no segundo modelo ser menor do que no primeiro, o valor global despendido com o equipamento

até o 14º ano de uso apresenta-se inferior quando submetido ao regime de contrato de manutenção avulsa quando comparado ao contrato de manutenção a preço fixo.

O terceiro modelo propõe uma análise mais minuciosa e detalhista por meio do envolvimento de mais parâmetros do que os modelos anteriores. Além do custo com aquisição e revenda já citados, associa a receita gerada pelo equipamento com a realização de exames e o cálculo do lucro cessante proveniente da receita que deixa de ser gerada pelo equipamento parado devido à indisponibilidade da máquina. Observa-se que o período de transição em que a receita deixa de superar os gastos ocorre em 20 anos para equipamentos submetidos ao regime de contrato de manutenção a preço fixo, diferentemente dos 17 anos para os equipamentos que pagam manutenções e peças avulsas sob demanda. O MTTR de 7,5 dias foi obtido por meio da análise do histórico de reparos do equipamento.

Por fim, as conclusões deste estudo indicam a dificuldade de associar questões econômicas e confiabilidade para determinação de período ótimo para substituição de equipamentos intensivos em tecnologia. Contudo, os resultados obtidos servirão como base para tomada de decisão da alta direção do EAS. As comparações que foram realizadas indicam que tanto o período ótimo para substituição de equipamentos quanto os custos equivalentes anuais que utilizam a prática de contratos de manutenção a preço fixo serão superiores ao pagamento de manutenção corretiva conforme demanda.

Equipamentos com contrato de manutenção possuem prioridade de atendimento por parte da assistência técnica, e alguns contratos possuem cláusula de multa por excesso de tempo de máquina parada, o que implica num maior empenho do representante em agilizar os serviços e fornecimento de peças para os equipamentos submetidos a contratos de preço fixo. Contudo, apesar de equipamentos com contratos de manutenção a preço fixo possuírem um ciclo de vida superior quando comparados aos equipamentos que pagam por manutenções e peças avulsas sob demanda, os resultados obtidos indicam que o aumento do lucro cessante é compensado pela redução dos custos com manutenção, mesmo considerando a falta de priorização de atendimentos por parte do fabricante no caso de não haver contrato de manutenção, o que acarreta maior indisponibilidade da máquina.

De forma geral, os quatro modelos propostos são aplicáveis a diferentes perfis de EAS e diferentes equipamentos, considerando a disponibilidade dos dados que poderão definir qual modelo será mais adequado para análise de cada máquina. Daí destaca-se a necessidade e importância do registro de dados reais a fim de embasar decisões estratégicas do EAS com um SEC estruturado que possam assessorar a alta direção no que se relaciona ao investimento em

tecnologias para a saúde. Porém, para a aplicação numérica em questão o quarto modelo apresenta-se como mais realístico quando considera a produtividade do equipamento durante pleno funcionamento, o número esperado de falhas durante o período e o custo para solucionar tais falhas a fim de manter o equipamento em uso por 17 anos como sugere. Supera assim o tempo de vida útil estipulado pelo fabricante como indução à renovação de parque instalado.

Uma comparação entre os quatro modelos sob ótica realística, por meio da consideração de fatores como a receita gerada pelo equipamento assim como o valor que deixa de ser obtido devido a sua indisponibilidade, o quarto modelo proposto apresenta-se como ideal quando se trata de avaliação de equipamentos médicos intensivos em tecnologia, em que se estabeleceu a incorporação de atributos relevantes para definição de um modelo matemático o qual presume uma aplicação totalmente coerente com a realidade dos EAS.

Sendo assim, ao final do desenvolvimento deste estudo ressalta-se a compreensão do quanto os atributos designados para os modelos matemáticos impactam na determinação do período de obsolescência de equipamentos médicos, como também a diferença entre os investimentos financeiros para máquinas submetidas a regime de contrato a preço fixo e equipamentos com pagamento de manutenção avulsa. Apesar de contratos de manutenção a preço fixo serem usualmente mais comuns entre os EAS por permitirem uma programação financeira de gastos com a manutenção do equipamento e por existir uma priorização dos atendimentos e fornecimento de peças, as precificações dos contratos é superestimada para atender certa quantidade de chamados e substituição de possíveis peças. Além disso, é necessário incluir os custos com toda a estrutura de *background* da empresa acarretando valores extremamente elevados. A falta de opções de empresas que prestem serviços de manutenção de equipamentos intensivos em tecnologia e que possuam acesso às senhas de administração dos sistemas operacionais, aquisição de softwares específicos e peças avulsas levam ao fechamento de contratos com o próprio fabricante.

Avaliando sob o mesmo prisma os contratos de manutenção avulsos, que não necessitam de uma obrigação financeira mensal para pagamento do contrato, mas sim de acordo com a demanda na ocorrência da falha, o processo de emissão de orçamento para primeiro atendimento, autorizações de agendamentos de serviços e liberação de peças, implicam morosidade para conclusão do serviço, além da aplicação de valores de peças e mão de obra abusivamente elevados. Se avaliado de forma pontual, a aquisição de manutenções sob demanda não representa a melhor decisão para gerenciamento deste nicho do parque

tecnológico de um EAS. Contudo, a longo prazo, e como os próprios resultados dos segundo e quarto modelos indicam, os custos acumulados com manutenção do equipamento é inferior mesmo considerando o tempo de máquina indisponível.

Desta forma, os estudos desenvolvidos neste trabalho permitiram uma contribuição na área de engenharia de confiabilidade, engenharia de produção com *insights* sobre o gerenciamento de manutenções e gestão de equipamentos da área médica. Além da ampliação de conhecimento referente aos conceitos necessários para a proposição dos modelos matemáticos, as formas de avaliação para decisão entre diferentes modalidades de contratação de serviços de manutenção puderam ser expostas a fim de incitar pensamentos críticos para os profissionais envolvidos neste tipo de decisão.

## 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Como limitações deste trabalho cita-se a desconsideração dos custos operacionais oriundos de recursos humanos e insumos indispensáveis para o funcionamento do equipamento. A dificuldade para obtenção deste tipo de informação não possibilitou a inclusão nos modelos propostos.

Nos períodos de substituição, foram considerados os novos equipamentos com características semelhantes, desconsiderando evoluções tecnológicas disponíveis no mercado.

A limitação de dados reais para o período de 2008-2015 implicou na necessidade de estimativa de dados para tempos futuros.

Durante o período de 2008-2015 o equipamento esteve sob regime de contrato de manutenção, isto implica em prioridade de atendimento e envio de peças. O tempo de reparo para equipamentos sem contrato de manutenção tende a ser maior visto que o processo de aprovação de orçamento e análise de crédito, assim como designação de recursos humanos para manutenção das máquinas segue processo distinto. Assim, o MTTR foi determinado com base nos tempos de reparo para equipamento com contrato de manutenção.

Foi considerado o fornecimento contínuo de peças por parte do fabricante ao longo do horizonte de estudos (30 anos). Este fato pode não ocorrer devido modelo do aparelho entrar em fim de produção e, legalmente o fabricante não tem obrigatoriedade de possuir mais peças de reposição para a máquina. A falta de uma peça após o período de produção pode acarretar em quebra sem condições de reparo, antecipando assim a necessidade de substituição do equipamento.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se aplicar destes modelos para diferentes tipos de equipamentos intensivos em tecnologia a fim de comparar o comportamento para tecnologias distintas.

A aplicação dos modelos para equipamentos de mesma categoria, mas de fabricantes distintos a fim de avaliar desempenho das marcas disponíveis no mercado, pode ser utilizado como critério de escolha no momento de aquisição de uma nova máquina.

A análise de históricos de falhas de equipamentos, sob o método aplicado neste estudo, permite a avaliação da qualidade da manutenção que é prestada pelos fabricantes, podendo ser utilizada como ponto de discussão em busca da melhoria na prestação dos serviços contratados.

O desenvolvimento de um quinto modelo que associe um período de tempo com o equipamento submetido ao regime de contrato de manutenção e um período por contrato de manutenção avulsa.

## REFERÊNCIAS

ANTUNES, Elisabeth; VALE, Marcio do; MORDELET, Patrick; GRABOIS, Victor. *Gestão da Tecnologia Biomédica: Tecnovigilância e Engenharia Clínica*. 1ª edição. França, ACODESS, 2002, 210p.

AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, ANVISA. Serviços. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/wps/portal/anvisa/anvisa/servico!/ut/p/c4/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hnd0cPE3MfAwMDMydnA093Uz8z00B\\_A3dLY\\_2CbEdFACyYXPk!/?1dmy&urile=wcm%3Apath%3A/anvisa+portal/anvisa/servicos/como+pesquisar/a+z/conceitos+tecnicos](http://portal.anvisa.gov.br/wps/portal/anvisa/anvisa/servico!/ut/p/c4/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hnd0cPE3MfAwMDMydnA093Uz8z00B_A3dLY_2CbEdFACyYXPk!/?1dmy&urile=wcm%3Apath%3A/anvisa+portal/anvisa/servicos/como+pesquisar/a+z/conceitos+tecnicos)>. Acesso em: 08 de out. de 2014.

AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, ANVISA. Manual para regularização de equipamentos médicos na Anvisa. Brasília: ANVISA/GQUIP, 2010, 170 p. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/991239804745928e9ae1de3fbc4c6735/manual\\_EquipMed\\_Anvisa\\_abr\\_10.pdf?MOD=AJPERES](http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/991239804745928e9ae1de3fbc4c6735/manual_EquipMed_Anvisa_abr_10.pdf?MOD=AJPERES)>. Acesso em: 11 de out. de 2014;

BABAI, Mohamed Zied; SYNTETNOS, Aris; TEUNTER, Ruud; Intermittent demand forecasting: An empirical study on accuracy and the risk of obsolescence. *International Journal Production Economics*. Elsevier, 2014, p. 212-219.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. Diretrizes metodológicas: elaboração de estudos para avaliação de equipamentos médicos assistenciais. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília: Ministério da Saúde, 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Equipamentos Médico-Hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção*. Brasília/DF, 2002.

BRASIL. Nota técnica N°.02/2012/GQUIP/GGTPS/ANVISA. Disponível em: [http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/63d943804a70f20ab6dff64600696f00/Nota+T%C3%A9cnica+02\\_2012\\_GQUIP+Equipamentos+eletrom%C3%A9dicos.pdf?MOD=AJPERES](http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/63d943804a70f20ab6dff64600696f00/Nota+T%C3%A9cnica+02_2012_GQUIP+Equipamentos+eletrom%C3%A9dicos.pdf?MOD=AJPERES)>. Acesso em: 04 de out. de 2014;

BRATTON, Daniel; KENNEDY, James. In: 2007 IEEE swarm intelligence symposium. IEEE, Honolulu, 2007. *Defining a standard for particle swarm optimization*. p. 120-127.

BRONZINO, Joseph D.; DAVID, Yadin; MALTHZAHN, Wolf W. von; NEUMAN, Michel R. *Clinical Engineering*. Washington, CRC Press, 2005, 555p.

BURMESTER, Haino; HERMINI, Alexandre Henrique; FERNANDES, Jorge Alberto Lopes. *Gestão de materiais e equipamentos hospitalares*. 1ª edição. São Paulo, Saraiva, 2013, 213p.

CALIL, Saide Jorge; TEIXEIRA, Marilda Solon. *Gerenciamento de manutenção de equipamentos hospitalares*. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 1998. (Série Saúde & Cidadania, v. 11).

- CAMPBELL, John D.; JARDINE, Andrew K.S.; MCGLYNN, Joel. *Asset management excellence: optimizing equipment life-cycle decisions*. 2<sup>o</sup> edition. Boca Raton, CRC Press, 2011, 465p.
- CHRISTER, A.H.; SCARF, P.A. *A Robust Replacement Model with Applications to Medical Equipment*. Great Britain, Journal of Operational Research Society, 1994, vol 45, n<sup>o</sup>3, 261-275.
- CORRÊA, T.L.; LINS, I.D.; MOURA, M.J.C.; DROGUETT, E.L. In: 26<sup>th</sup> European Safety and Reliability Conference, Glasgow, 2016. *Generalized renewal process based on the q-Weibull distribution for reliability applications*.
- DYRO, Joseph. *Clinical Engineering handbook*. New York, Elsevier Academic Press, 2003, 674p.
- FIRMINO, P. R. A.; MOURA, M. das C.; PONTUAL, A. de O.; LINS, I. D.; DROGUETT, E. L. In: Congresso Pan-Americano de Engenharia Naval, Transporte Marítimo e Engenharia Portuária, 20, São Paulo, 2007. *Política ótima de manutenção preventiva de sistemas reparáveis baseada em confiabilidade*.
- GUEDES, B. N.; MOURA, M.; LINS, I.D.; ZAIDAN, H. P. S.; MORAIS, D.; DROGUETT, E.L.; PASCUAL, R. In: 25<sup>th</sup> European Safety and Reliability Conference, Zurique, 2015. *Negotiation of extended warranties for medical equipment*.
- HOORICKX, Paul F. Van. *Sustaining Engineering Challenges in Long-Lifecycle Medical Electronics*. Freemont, CA, 2008.
- JARDINE, Andrew K. S. and TSANG, Albert H. C. *Maintenance, replacement and reliability: Theory and applications*. 2<sup>o</sup> edition. New York, CRC Press, 2013.
- KATZ, Zeev. Estudo de metodologias econômicas e multiparamétricas aplicadas à decisão de substituição de equipamentos médicos. Campinas/SP, 1998. (Mestrado – Departamento de Engenharia Biomédica / Universidade Estadual de Campinas).
- KENNEDY, J.; ERBERHART, R. C. *Swarm intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001.
- KIJIMA M.; SUMITA, N. A useful generalization of renewal theory: counting process governed by non-negative Markovian increments. *Journal of Applied Probability*, 23, 71-88, 1986.
- MELLAL, Mohamed Arezki; ADJERID, Smail; BENAZZOUZ, Djamel; BERRAZOUANE, Sofiane; WILLIAMS, Edward J. Optimal Policy for the Replacement of Industrial Systems Subject to Technological Obsolescence – Using Genetic Algorithm. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 10, No. 1: 198-208, 2013.
- MODARRES, Mohammad; KAMINSKIY, Mark; KRIVTSOV, Vasiliy. *Reliability engineering and risk analysis: A practical guide*. Marcel Dekker, New York, 2000.

NGUYEN, T.P. Khanh; YEUNG, Thomas G.; CASTANIER, Bruno. Optimal maintenance and replacement decisions under technological change with consideration of spare parts inventories. *International Journal Production Economics*, 143: 472-477, 2013.

O'CONNOR, Patrick D. T; KLEYNER, Andre. *Practical reliability engineering*. 5<sup>a</sup> edition. United Kingdom, Wiley, 2012.

OLIVEIRA, Eduardo Frota. Programa de gerenciamento de equipamentos médicos: noções de boas práticas de gerenciamento de equipamentos e acreditação hospitalar. Ceará, 2009. (Especialização – Escola de saúde pública do Ceará).

OLIVEIRA, Marilyn Cristine Serafim; SILVA, Thales Lima; ALOISE, Dario José. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – SBPO, 36, São João del Rei, 2004, *Otimização por nuvem de partículas: diferença entre aplicações em problemas contínuos e discretos*.

RAUSAND, Marvin; HOYLAND, Arnljot. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 2<sup>a</sup> edition. New Jersey, Miley, 2004.

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/UFPE)

SANTOS, Cleônimo dos. *Depreciação de bens do ativo imobilizado*. 6<sup>a</sup> Edição. São Paulo. IOB, 2015.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. *PCM: Planejamento e controle da manutenção*. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2002.

YAÑEZ, Medardo; JOGLAR, Francisco; MODARRES, Mohammad. Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience. Elsevier, 2002. *Reliability Engineering and System Safety* 77, 167–180p.