

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Álvaro Pugliese de Sá

**GERENCIAMENTO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-
HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO**

Porto Alegre

2016

Álvaro Pugliese de Sá

**GERENCIAMENTO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-
HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientador: Prof. José Luis Duarte
Ribeiro, Dr.

Porto Alegre

2016

Álvaro Pugliese de Sá

**GERENCIAMENTO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-
HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, na modalidade Profissional, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Orientador PMPEP/UFRGS

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Ph.D.
Coordenador PMPEP/ UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Flávio Sanson Fogliatto, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professor Juan Pablo Raggio Quintas, Dr. (DEMEC/UFRGS)

Professora Márcia Elisa Soares Echeveste, Dr. (PPGEP/UFRGS)

*A minha família, em especial
minha mãe Maria Inês Pugliese
e meu pai Lauro Machado Sá
Filho, pelas inestimáveis
contribuições à formação do meu
caráter.*

AGRADECIMENTOS

Ao fim deste trabalho, gostaria de agradecer, primeiramente, a minha família e amigos pelo apoio e incentivo não apenas para realização desta dissertação, mas também durante toda a minha vida.

Em especial, agradeço ao professor José Luis Duarte Ribeiro pelos conselhos e considerações, que foram fundamentais para elaboração do estudo.

Agradeço a Deus, por tudo.

*“Nada verdadeiramente
valioso advém da ambição ou do
mero senso do dever; é melhor que
venha do amor e da devoção à
humanidade e às coisas objetivas.”*

Albert Einstein

RESUMO

Esta dissertação apresenta a importância do gerenciamento da confiabilidade de um produto durante seu desenvolvimento. Tal gerenciamento consiste em um processo sistemático que resulta no alcance dos requisitos governamentais, do cliente e da empresa. Estudou-se a metodologia de gerenciamento da confiabilidade através do planejamento da confiabilidade meta, alocação ótima de confiabilidade, avaliação e modelagem da confiabilidade, planejamento do crescimento da confiabilidade, controle do crescimento da confiabilidade até a obtenção dos resultados planejados. Através dessa metodologia, em um estudo aplicado contemplando um produto médico-hospitalar, foi possível: (a) identificar os componentes críticos do produto, (b) identificar a lacuna existente entre o valor de confiabilidade no início do projeto quando comparado à meta, (c) planejar o crescimento da confiabilidade ao longo das fases do projeto, (d) realizar melhorias ou reprojatos nos componentes do produto, (e) controlar o crescimento da confiabilidade e (f) alcançar a confiabilidade planejada. Os resultados obtidos foram de um aumento de 24% para 100% na confiabilidade do produto para cinco anos de utilização e de 0% para 83% para dez anos de utilização. Os valores obtidos de confiabilidade superaram os valores planejados, confirmando a eficiência da metodologia adotada.

Palavras-chave: gerenciamento da confiabilidade, planejamento da confiabilidade, alocação ótima de confiabilidade, gerenciamento do crescimento confiabilidade, desenvolvimento de produtos, produto médico.

ABSTRACT

This study discusses the relevance of Product Reliability Management during the product development phase. It consists of a systematic process that results in achieving the requirements of government regulations, customer satisfaction and companies goals. We studied the Product Reliability Management methodology through five aspects, including: target planning, optimal allocation, evaluation and modeling of product reliability, growth planning, and growth control to achieve the planned results. Using this methodology, applied in a study comprising the analysis of a medical product, it was possible to: (a) identify the critical components of the product (b) identify the gap between the reliability rate at the beginning of the project when compared to the final target (c) plan the growth of reliability throughout the phases of the project (d) make improvements or redesign product components (e) control the growth of reliability and (f) achieve the planned product reliability. The obtained results show an increase of 24% to 100% on five years product reliability, and from 0% to 83% for ten years product reliability. The values of reliability exceeded the planned values, confirming the effectiveness of the Product Reliability Management methodology.

Keywords: product reliability management, product reliability planning, product reliability allocation, product reliability growth management, product development, medical product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de blocos de um dado sistema	28
Figura 2.2: Dispositivo médico em seu arranjo em série	34
Figura 2.3: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Alimentador para a primeira fase de projeto	41
Figura 2.4: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Pressurizador para a primeira fase de projeto	42
Figura 2.5: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento para a primeira fase de projeto	42
Figura 2.6: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para a Válvula para a primeira fase de projeto.....	42
Figura 2.7: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Transferidor para a primeira fase de projeto	43
Figura 2.8: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização para a primeira fase de projeto.....	43
Figura 3.1: Estrutura molecular Polidimetilsiloxano	51
Figura 3.2: Molécula base Dimetilsiloxano	52
Figura 3.3: Modelo do processo de gerenciamento do crescimento da confiabilidade	55
Figura 3.4: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade	56
Figura 3.5: Processo de desenvolvimento de produtos John Deere	59
Figura 3.6: Etapas de gerenciamento da confiabilidade John Deere	59
Figura 3.7: Processo de desenvolvimento de produto e etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade John Deere	60
Figura 3.8: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade, para cinco anos de uso, ao longo das fases de projeto.....	65
Figura 3.9: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade, para dez anos de uso, ao longo das fases de projeto.....	65
Figura 3.10: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização na segunda fase de projeto	69
Figura 3.11: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização para a primeira e segunda fase de projeto.....	69
Figura 3.12: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira e segunda fase de projeto	70

Figura 3.13: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização na terceira fase de projeto	73
Figura 3.14: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização para a primeira, segunda e terceira fase de projeto.....	74
Figura 3.15: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda e terceira fase de projeto para cinco anos de uso	75
Figura 3.16: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda e terceira fase de projeto para dez anos de uso.....	75
Figura 3.17: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização na quarta fase de projeto	78
Figura 3.18: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto.....	78
Figura 3.19: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto para cinco anos de uso.....	79
Figura 3.20: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto para dez anos de uso.....	80
Figura 3.21: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização na quinta fase de projeto	82
Figura 3.22: Curva da confiabilidade do produto <i>versus</i> o tempo de utilização para todas as fases do projeto.....	82
Figura 3.23: Curva de controle de crescimento da confiabilidade para cinco anos de uso para todas as fases do projeto	83
Figura 3.24: Curva de controle de crescimento da confiabilidade para dez anos de uso para todas as fases do projeto	84
Figura A1: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Alimentador na segunda fase de projeto	101
Figura A2: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na segunda fase de projeto	102
Figura A3: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para a Válvula na segunda fase de projeto	102
Figura A4: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Transferidor na segunda fase de projeto	102
Figura A5: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Alimentador na terceira fase de projeto	103

Figura A6: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na terceira fase de projeto	103
Figura A7: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para a Válvula na terceira fase de projeto	103
Figura A8: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Transferidor na terceira fase de projeto.....	104
Figura A9: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na quarta fase de projeto	104
Figura A10: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Transferidor na quarta fase de projeto	104
Figura A11: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade <i>versus</i> o tempo de utilização do produto para o Transferidor na quinta fase de projeto	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Número de acionamentos e confiabilidade meta de acordo com o tempo de uso .	38
Tabela 2.2: Especificação dos componentes para primeira fase de projeto.....	39
Tabela 2.3: Valores-p obtidos no teste de aderência de K-S para cada modelo probabilístico	40
Tabela 2.4: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a primeira fase de projeto.....	40
Tabela 2.5: Parâmetros de forma, escala e localização para a primeira fase de projeto	41
Tabela 2.6: Confiabilidade meta para cinco e dez anos de utilização do produto	44
Tabela 3.1: Especificação dos componentes para primeira fase de projeto.....	62
Tabela 3.2: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para primeira fase de projeto.....	62
Tabela 3.3: Confiabilidade meta para cinco e dez anos de utilização do produto	62
Tabela 3.4: Especificação dos componentes para segunda fase de projeto	67
Tabela 3.5: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a segunda fase do projeto.....	67
Tabela 3.6: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para segunda fase do projeto.....	69
Tabela 3.7: Especificação dos componentes para terceira fase de projeto	71
Tabela 3.8: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a terceira fase do projeto.....	72
Tabela 3.9: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para terceira fase do projeto.....	73
Tabela 3.10: Especificação dos componentes para quarta fase de projeto	76
Tabela 3.11: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a quarta fase do projeto.....	77
Tabela 3.12: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para quarta fase de projeto.....	78
Tabela 3.13: Especificação dos componentes para quinta fase de projeto	80
Tabela 3.14: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a quinta fase do projeto.....	81
Tabela 3.15: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para quinta fase de projeto.....	82
Tabela 3.16: Resumo das alterações realizadas em cada fase de projeto	85

Tabela A1: Dados de falha do Alimentador na primeira fase do projeto	95
Tabela A2: Dados de falha do Pressurizador na primeira fase do projeto.....	95
Tabela A3: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na primeira fase do projeto	96
Tabela A4: Dados de falha da Válvula na primeira fase do projeto	96
Tabela A5: Dados de falha do Transferidor na primeira fase do projeto.....	96
Tabela A6: Dados de falha do Alimentador na segunda fase do projeto.....	97
Tabela A7: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na segunda fase do projeto.....	97
Tabela A8: Dados de falha da Válvula na segunda fase do projeto.....	97
Tabela A9: Dados de falha do Transferidor na segunda fase do projeto	98
Tabela A10: Dados de falha do Alimentador na terceira fase do projeto	98
Tabela A11: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na terceira fase do projeto	99
Tabela A12: Dados de falha da Válvula na terceira fase do projeto.....	99
Tabela A13: Dados de falha do Transferidor na terceira fase do projeto	99
Tabela A14: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na quarta fase do projeto	100
Tabela A15: Dados de falha do Transferidor na quarta fase do projeto	100
Tabela A16: Dados de falha do Transferidor na quinta fase do projeto	101

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS.....	15
1.2. TEMA E OBJETIVOS.....	16
1.3. JUSTIFICATIVA DO TEMA	16
1.4. METODOLOGIA.....	17
1.5. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
REFERÊNCIAS	22
2. PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO- HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO	23
2.1. INTRODUÇÃO.....	23
2.2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
2.5. CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	45
3. GERENCIAMENTO DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO PARA OBTENÇÃO DA CONFIABILIDADE META	48
3.1. INTRODUÇÃO.....	48
3.2. REFERENCIAL TEÓRICO	49
3.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	61
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
3.5. CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS	86
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
4.1. CONCLUSÃO.....	88
4.2. PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	94

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve introdução acerca de confiabilidade, seguido do tema escolhido e os objetivos do estudo, bem como a justificativa do tema e o método escolhido para atingir os objetivos. Por fim, apresentam-se as delimitações da pesquisa.

1.1. COMENTÁRIOS INICIAIS

A confiabilidade de produtos e processos é um tema de grande importância em um contexto global e tem sido impulsionada pela revolução tecnológica que vem ocorrendo nas últimas décadas. Pode-se afirmar, porém, como já destacava Lloyd e Lipow (1984), que a Segunda Guerra Mundial foi responsável por acelerar esta revolução, tendo em vista a necessidade de armamentos militares que não poderiam deixar de cumprir suas funções durante a guerra. Assim, nesta época intensificou-se a preocupação com a confiabilidade dos produtos militares. Posteriormente esta ênfase seria refletida em diversos setores da indústria mundial.

Atualmente o tema confiabilidade está difundido em todos os segmentos industriais, como, por exemplo, no setor automobilístico, na construção civil, nas indústrias química e médica. Independentemente do setor, as empresas estão enfrentando desafios para se manter competitivas no mercado globalizado, e, conforme Wasserman e Sudjianto (1996) já enfatizavam, um fator básico de decisão para o consumidor é a qualidade do produto ou serviço prestado. O que se observa nos dias atuais é que, devido à grande variedade de alternativas e opções competitivas no mercado, somado, muitas vezes, à dependência do ser humano a alguns produtos, os consumidores não mais aceitam produtos que necessitam reparos frequentes.

Segundo Guimarães (2002), com o aumento da importância deste tema, produzir bens com elevada confiabilidade tornou-se essencial para que as empresas possam manter ou ampliar sua participação no mercado e proporcionar a satisfação dos clientes atendendo suas expectativas em relação ao desempenho do produto. Para atender tais níveis de confiabilidade, as empresas estão unindo esforços nas áreas de Projeto, Produto, Processos e Qualidade visando realizar estudos de confiabilidade durante as fases de desenvolvimento de novos produtos. Esses estudos permitem trabalhar nas possíveis causas de falhas antes destas ocorrerem em campo (GUIMARÃES, 2002).

De acordo com AMSAA (2011), para atender os níveis de confiabilidade requeridos pelo consumidor, é importante que durante as fases de desenvolvimento do

produto seja realizado o gerenciamento da confiabilidade. Tal gerenciamento permite: avaliar a condição atual do produto, planejar o valor meta de confiabilidade que o produto deve apresentar, promover o crescimento da confiabilidade e atingir o valor de confiabilidade planejado.

Segundo Martins (2011), é com base no gerenciamento da confiabilidade que se pode optar em: revisar o cronograma do programa, aumentar ou reduzir a quantidade de testes de validação e adicionar recursos financeiros ou humanos para o desenvolvimento. Martins (2011) afirma que, o aumento da confiabilidade não é gerado apenas pelo uso do gerenciamento da confiabilidade, mas sim, pelas ações que a equipe responsável pelo projeto deve tomar após as análises de falhas dos testes do produto em desenvolvimento.

1.2. TEMA E OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como tema geral o gerenciamento da confiabilidade, aplicado no projeto de desenvolvimento de um novo produto. Assim, o trabalho aborda o ciclo de desenvolvimento de um produto. Iniciando pela fase preliminar de projeto, avaliação da confiabilidade atual do produto, especificação, alocação e planejamento da confiabilidade desejada, realização de testes funcionais e melhorias no projeto dos componentes do produto baseadas em estudos de confiabilidade, que visam auxiliar às tomadas de decisão e garantir que os requisitos dos clientes sejam atendidos.

As divisões do tema geral são as seguintes: planejamento e alocação ótima de confiabilidade e gerenciamento do crescimento da confiabilidade em desenvolvimento de novos produtos.

O escopo específico desta pesquisa envolve o gerenciamento da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento.

O objetivo geral do trabalho é promover o acréscimo da confiabilidade em um produto médico-hospitalar durante suas fases de desenvolvimento para o alcance do valor de confiabilidade planejada (desejada) para o produto. Os objetivos específicos são os seguintes: (a) avaliar a confiabilidade atual do produto; (b) especificar a meta de confiabilidade a ser alcançada; (c) melhorar as propriedades mecânicas dos componentes do produto e por fim, (d) alcançar a confiabilidade meta especificada para o produto.

1.3. JUSTIFICATIVA DO TEMA

O produto em desenvolvimento que é o objeto da pesquisa é um sistema de cinco componentes em série que permanece implantado no paciente por no mínimo cinco anos.

Os componentes são submetidos durante a vida útil do produto à cargas cíclicas. Dessa forma, além das complicações inerentes a qualquer cirurgia, poderão ocorrer falhas mecânicas durante a utilização do produto.

Considerando o tema e tipo de produto, essa pesquisa é importante e deve necessariamente ser realizada, visto que falhas precoces nesse tipo de produto impactam diretamente na recuperação e na vida dos pacientes. Como resultado dessas falhas pode-se citar, por exemplo, a inutilização do produto seguida da necessidade de intervenção cirúrgica no paciente para a troca do produto. Além disso, essa discussão é relevante para a empresa, pois se trata de uma empresa que desenvolve e comercializa produtos Médico-Hospitalares e atualmente trabalha com um valor referência de confiabilidade para cada um de seus produtos, pois necessita planejar e assegurar a confiabilidade para se manter competitiva no mercado. Portanto, os produtos em desenvolvimento na empresa devem alcançar um determinado valor referência de confiabilidade antes de serem lançados no mercado.

Do ponto de vista social essa pesquisa é relevante, visto que, com o lançamento de um produto confiável no mercado, os médicos irão se sentir mais seguros quanto à escolha do produto a ser utilizado nas implantações, pois terão confiança que não será necessário realizar uma nova cirurgia para substituir o produto, devido a falhas precoces no dispositivo. Em consequência disso, os pacientes terão maior tranquilidade antes da implantação, pois irão saber que trata-se de um produto confiável e, portanto, de qualidade. Lembrando que, segundo Martins (2011), existe intensa ligação entre a qualidade e confiabilidade, pois ambas possuem o efeito de atender as expectativas do cliente como um sistema causa-efeito no qual, sem confiabilidade não há qualidade e, portanto, há insatisfação do cliente.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa é relevante porque combina os conceitos de gerenciamento do crescimento da confiabilidade com algoritmos de alocação ótima de confiabilidade para atingir as metas do sistema no menor tempo e/ou custo possível. O trabalho é apoiado principalmente pela empresa, a qual está desenvolvendo o produto. Essa irá contribuir com a infraestrutura física necessária para a produção e realização dos testes funcionais dos componentes.

1.4. METODOLOGIA

Esta seção apresenta o método de pesquisa e de trabalho que será utilizado para atingir os objetivos propostos.

1.4.1. MÉTODO DA PESQUISA

A classificação das pesquisas em exploratórias, descritivas e explicativas de acordo com seus objetivos é útil para possibilitar uma aproximação conceitual (GIL, 2002). Esse autor define as pesquisas exploratórias, descritivas e explicativas da seguinte maneira:

As pesquisas exploratórias têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, a fim de torná-lo mais explícito ou construir hipóteses. Gil (2002), afirma também que esse tipo de pesquisa tem como objetivo principal o aprimoramento de ideias e a descoberta de intuições. Na maioria dos casos, esse tipo de pesquisa envolve o levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que possuem experiência prática no problema e análise de exemplos.

Gil (2002) afirma que as pesquisas descritivas possuem como objetivo principal a descrição de características de determinada população ou fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Uma das características mais significativas desse tipo de pesquisa está na utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como questionários e a observação sistemática. Segundo Gil (2002), essas pesquisas geralmente assumem a forma de levantamento. Os exemplos mais comuns de pesquisas descritivas são as que têm por objetivo estudar características de um determinado grupo, levantar opiniões, atitudes e crenças de uma determinada população e descobrir a existência de associações entre variáveis, como por exemplo, pesquisas eleitorais que indicam a relação entre a preferência político-partidária com o nível social ou de escolaridade de uma determinada população.

A pesquisa explicativa é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade. Além disso, o conhecimento científico está assentado nos resultados apresentados por pesquisas explicativas. Todavia, isso não significa que os tipos de pesquisas exploratórias e descritivas possuem menos valor, até porque, segundo Gil (2002), esses tipos de pesquisa quase sempre são etapas prévias insupersáveis para se obter explicações científicas.

Gil (2002) afirma que, para analisar os fatos do ponto de vista empírico, para confrontar a visão teórica com os dados da realidade, torna-se necessário traçar um modelo conceitual e operativo da pesquisa. Na literatura científica esse modelo recebe o nome de delineamento (GIL, 2002).

O delineamento, segundo Gil (2002), refere-se ao planejamento da pesquisa que envolve tanto a diagramação quanto a previsão da análise dos dados coletados. Além disso, o delineamento considera o ambiente em que os dados são coletados e as formas de controle das variáveis envolvidas.

O elemento mais importante para a identificação de um delineamento é o procedimento técnico adotado para a coleta de dados. Segundo Gil (2002) esses procedimentos técnicos são divididos em dois grandes grupos de delineamentos: os procedimentos que se valem de fontes de “papel” e aqueles que os dados são fornecidos por pessoas. No primeiro grupo estão as pesquisas bibliográficas e documentais. No segundo, estão a pesquisa experimental, *ex-post facto*, o levantamento, o estudo de caso, a pesquisa-ação e a pesquisa participante (GIL, 2002).

As pesquisas explicativas nas ciências naturais são realizadas quase que exclusivamente por procedimento técnicos ou métodos experimentais (GIL, 2002).

Segundo Gil (2002), a pesquisa experimental constitui o delineamento mais prestigiado nos meios científicos. Esse procedimento técnico de pesquisa consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Trata-se, portanto, de uma pesquisa em que o pesquisador é um agente ativo, e não um observador passivo (GIL, 2002).

As pesquisas experimentais constituem o mais valioso procedimento disponível aos cientistas para testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis. Em virtude de suas possibilidades de controle, os experimentos oferecem garantia muito maior do que qualquer outro delineamento de que a variável independente causa efeitos na variável dependente (Gil, 2002).

Diante disso, este estudo é classificado quanto sua natureza como pesquisa aplicada, tendo em vista que seu conteúdo teórico é explorado e direcionado à solução de problemas (GIL, 1991). Quanto sua abordagem, essa dissertação é enquadrada como pesquisa quantitativa, pois faz uso de análises numéricas. Por fim, considerando o que foi apresentado nos parágrafos anteriores, esta pesquisa é classificada quanto a seus objetivos em pesquisa explicativa e quanto a seus procedimentos técnicos em pesquisa experimental.

1.4.2. MÉTODO DE TRABALHO

A dissertação está dividida em dois artigos científicos. O primeiro artigo tem o seguinte título: planejamento e avaliação da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento. Esse artigo possui como objetivo geral o planejamento da confiabilidade meta a ser alcançada para o produto, seguido da avaliação da confiabilidade atual do produto.

O segundo artigo desta pesquisa tem como título: Gerenciamento do crescimento da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento para obtenção da confiabilidade meta. Esse artigo possui como objetivo geral o alcance da confiabilidade meta do produto através do gerenciamento do crescimento da confiabilidade.

1.5. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Delimitar uma pesquisa, segundo Lakatos e Marconi (2003), trata-se de estabelecer limites para a investigação. A pesquisa pode ser delimitada quanto ao assunto, quanto à extensão e quanto a uma série de fatores tais como, meios humanos e econômicos que podem restringir o campo de ação (LAKATOS e MARCONI, 2003).

Ander-Egg (1978) apresenta três níveis de limites, quanto ao objeto, ao campo de investigação e ao nível de investigação.

- a) limite quanto ao objeto: consiste na escolha de maior ou menor número de variáveis que intervêm no fenômeno a ser estudado.
- b) limite quanto o campo de investigação: abrange dois aspectos, limite no tempo, isto é, quando o fato deve ser estudado em um determinado momento e limite no espaço, quando o fato deve ser estudado em um determinado lugar.
- c) limite quanto o nível de investigação: o qual abrange três estágios: exploratórios, de investigação e de comprovação de hipóteses.

Segundo Lakatos e Marconi (2003), após a escolha do assunto, o pesquisador pode decidir pelo estudo de todo o universo da pesquisa ou apenas de uma amostra. A amostra deve ser representativa ou significativa.

Nem sempre há a possibilidade de pesquisar todos os indivíduos do grupo ou da comunidade que se deseja estudar, devido à escassez de recursos ou à premência do tempo. Nesse caso, utiliza-se o método da amostragem, que consistem em obter um juízo

sobre o total (universo), mediante a compilação e exame de apenas uma parte, a amostra, selecionada por procedimentos científicos (LAKATOS e MARCONI, 2003).

Considerando o que foi apresentado, quanto ao assunto, o presente trabalho abrange projetos de desenvolvimento de produtos que utilizam a confiabilidade como indicador fundamental para validação e liberação do produto para comercialização. O estudo abrange, ainda, projetos de melhoria contínua em produtos, através da metodologia de gerenciamento do crescimento da confiabilidade, mas o escopo limita-se a produtos médico-hospitalares desenvolvidos por uma empresa específica.

Os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa são apropriados para desenvolvimento de produtos que sofram algum tipo de desgaste (mecânico, elétrico, químico, entre outros) com o tempo. Acredita-se que os procedimentos utilizados no estudo podem ser utilizados em diversos tipos de produtos, não restringindo-se apenas à produtos médicos, mas isso não é explorado nesta dissertação.

Quanto ao campo de investigação, esse estudo limita-se aos resultados de pesquisas conduzidas ao longo de um período de 18 meses.

Quanto ao espaço, o estudo foi realizado em um cenário onde a fabricação e teste dos componentes e produto são realizados em local certificado com Boas Práticas de Fabricação (BPF).

Quanto ao nível de investigação, o estudo está direcionado para comprovação da hipótese que a metodologia sistemática de gerenciamento da confiabilidade dos componentes afeta a confiabilidade final do produto objeto do estudo.

Por fim, o estudo foi realizado apoiado no método da amostragem, visto que a demanda do produto será superior ao número de produtos testados.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em formato de dois artigos, onde os temas abordados são discutidos. O resultado dos dois artigos busca o alcance da confiabilidade desejada para o produto, através de um procedimento metodológico sistemático.

O estudo está estruturado em quatro capítulos. Este primeiro capítulo apresenta o tema, os objetivos, a justificativa para realização do estudo, o método de pesquisa e de trabalho utilizado e as delimitações do trabalho.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo, envolvendo o planejamento e avaliação da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento. Esse artigo busca cumprir com os objetivos específicos de avaliar a

confiabilidade atual do produto e planejar e/ou especificar a meta de confiabilidade a ser alcançada para o produto.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo, que aborda o gerenciamento do crescimento da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento para obtenção da confiabilidade meta. Esse segundo artigo busca cumprir com os objetivos específicos de melhorar as propriedades mecânicas dos componentes do produto e alcançar a confiabilidade meta especificada para o produto.

O quarto capítulo apresenta as considerações finais do estudo e proposições para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AMSAA. **Military handbook–189C: Reliability Growth Management**. United States of America: Department of Defense, 2011. 141 p.

ANDER-EGG, E. **Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales**. 7. ed. Buenos Aires: Humanitas, 1978. 270 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

GUIMARÃES, V. U. **Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LAKATOS, E. M. e MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2003. 312 p.

LLOYD, D; LIPOW, M. **Reliability: management, methods, and mathematics**. Milwaukee, Wisconsin – US: The American Society for Quality Control, 1984.

MARTINS, R. T. **Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

WASSERMAN, S. G. e SUDJANTO, A. A comparison of three strategies for forecasting warranty claims. **IIE Transactions**, v.28, p. 967-977, 1996.

2. PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO

RESUMO

Este capítulo apresenta a importância do estudo de confiabilidade para o planejamento da confiabilidade meta de um produto, a avaliação do desempenho de componentes e alocação ótima de confiabilidade ainda na fase de desenvolvimento do produto. Estudou-se a confiabilidade meta de um produto médico-hospitalar através de pesquisa de mercado, requisitos dos clientes, requisitos governamentais, *benchmarking* e engenharia reversa. A alocação ótima de confiabilidade foi implementada através da metodologia clássica *equal reliability allocation* e da metodologia de alocação proporcional. A modelagem e avaliação da confiabilidade atual foram realizadas utilizando o modelo de Weibull e os dados de falha dos componentes do produto, observados em testes funcionais. Por fim, foi realizada a análise dos resultados, que permitiu a identificação dos componentes críticos e da lacuna existente entre a situação atual e a confiabilidade meta planejada.

Palavras-chave: planejamento da confiabilidade, modelagem e avaliação da confiabilidade, alocação ótima de confiabilidade, desenvolvimento de produto, produto médico.

2.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as empresas estão enfrentando desafios para se manter competitivas no mercado globalizado, e um fator básico de decisão para o consumidor é a qualidade do produto ou serviço prestado (WASSERMAN E SUDJANTO, 1996). Segundo Martins (2011), existe intensa ligação entre a qualidade e confiabilidade, pois ambas possuem o efeito de atender as expectativas do cliente como um sistema causa-efeito no qual, sem confiabilidade não há qualidade e, portanto, há insatisfação do cliente.

Portanto, de acordo com Guimarães (2002), produzir bens com elevada confiabilidade tornou-se essencial para que as empresas possam manter ou ampliar sua participação no mercado e proporcionar a satisfação dos clientes atendendo suas expectativas em relação ao desempenho do produto.

Para atender tais níveis de confiabilidade, as empresas estão unindo esforços nas áreas de Projeto, Produto, Processos e Qualidade visando realizar estudos de confiabilidade durante as fases de desenvolvimento de novos produtos (GUIMARÃES, 2002). Dentre esses estudos encontra-se o planejamento da confiabilidade meta do produto.

Segundo Crowe (2001), o planejamento da confiabilidade é considerado uma etapa crítica em projetos para confiabilidade (do inglês *Design for Reliability (DfR)*) durante o desenvolvimento de produtos. Esse planejamento permite estimativas iniciais da complexidade dos projetos, o que está amplamente relacionado à meta de confiabilidade do produto em desenvolvimento.

Para realizar o planejamento da confiabilidade meta do produto, é fundamental entender os requisitos dos clientes. Para tanto, Crowe (2001), recomenda que se converse diretamente com o cliente e se realize estudos de *Benchmarking* e Engenharia reversa.

Considerando esse cenário, o tema geral deste capítulo é a confiabilidade, considerada um elemento essencial no projeto de desenvolvimento de um novo produto.

O produto em desenvolvimento que é objeto de estudo foi escolhido, por tratar-se de um sistema que permanece implantado no paciente por no mínimo cinco anos. Além disso, esse dispositivo é caracterizado como um sistema em série, composto por cinco componentes, passíveis de falhas mecânicas, onde a falha em um componente compromete o funcionamento de todo o sistema. Portanto, além das complicações inerentes a qualquer cirurgia, poderão ocorrer falhas mecânicas durante a utilização do produto, as quais acarretarão em intervenção cirúrgica.

Diante disso, o tema específico desse capítulo trata do gerenciamento da confiabilidade do produto durante sua fase de desenvolvimento. Esse tema é de suma importância no contexto competitivo atual, pois permite: planejar o valor meta de confiabilidade que o produto deve apresentar, avaliar a condição atual do produto, promover o crescimento da confiabilidade durante as etapas de desenvolvimento e atingir o valor de confiabilidade planejado.

O objetivo geral deste trabalho pode ser enunciado como o planejamento da confiabilidade meta a ser alcançada para o produto, seguido da avaliação da confiabilidade atual do produto.

Este capítulo está estruturado em cinco seções. Esta primeira seção (2.1) apresenta o contexto do estudo, objetivos do trabalho e sua justificativa. Na segunda seção (2.2), é apresentado o referencial teórico a respeito de confiabilidade de produtos, planejamento e alocação de confiabilidade durante o desenvolvimento de novos produtos e avaliação de confiabilidade de sistemas. A terceira seção (2.3) apresenta os procedimentos metodológicos para o planejamento, alocação e avaliação atual da confiabilidade do produto. Os resultados e discussões do estudo são apresentados na seção quatro (2.4), seguido das conclusões na seção cinco (2.5).

2.2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção discorre sobre confiabilidade de produtos, planejamento e alocação de confiabilidade durante o desenvolvimento de novos produtos e métodos de avaliação de confiabilidade.

2.2.1. CONFIABILIDADE

Com o advento da economia globalizada e o aumento da competitividade entre empresas, observou-se um aumento na demanda por produtos, processos e sistemas de melhor desempenho a custos competitivos. Com isso, surgiu à necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos, processos e sistemas, o que resultou em uma ênfase crescente em sua confiabilidade.

Em seu sentido mais amplo, como destacam Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade está associada à operação bem sucedida de um produto, processo ou sistema sem que haja quebras ou falhas. No entanto, é necessária uma definição quantitativa de confiabilidade, a qual é expressa em termos de probabilidade. Leemis (1995) define confiabilidade como a probabilidade de um item desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas. Segundo Kim et al. (2013), confiabilidade é definida como a habilidade do sistema desempenhar suas funções em condições de operação e tempo especificados e deve ser medida através da probabilidade de sobrevivência ou taxa de falhas.

De acordo com Fogliatto e Ribeiro (2009), a confiabilidade é definida como probabilidade, portanto, deve apresentar valores entre 0 e 1. Além disso, a confiabilidade deve especificar o propósito ou uso pretendido para o item (sistema ou componente) em estudo, assim como as condições ambientais e o período de tempo em que o item será submetido. O termo tempo, como destacam Fogliatto e Ribeiro (2009), não deve ser interpretado literalmente, visto que em diversos contextos o tempo até a falha pode ser expresso em quilômetros ou ciclos, por exemplo.

Como já destacava Martins (2011), é importante mencionar a ligação existente entre a qualidade e confiabilidade, visto que ambos possuem o efeito de atender as expectativas do cliente como em sistema causa-efeito no qual, sem confiabilidade não há qualidade e, portanto, há insatisfação do cliente.

De acordo com Guo et al. (2014), o valor quantitativo de confiabilidade requerido para um dado sistema, deve ser planejado ou projetado o mais cedo possível na etapa de desenvolvimento de um produto.

A próxima subseção apresenta o planejamento ou projeto da confiabilidade de sistemas.

2.2.1.1. PLANEJAMENTO DA CONFIABILIDADE

O planejamento da confiabilidade é considerado uma etapa crítica em projetos para confiabilidade (do inglês *Design for Reliability (DfR)*) durante o desenvolvimento de produtos. Esse planejamento permite estimativas iniciais da complexidade de projetos, o que está amplamente relacionado à meta de confiabilidade do produto em desenvolvimento (CROWE, 2001).

Esta etapa inicia-se primeiramente com o entendimento dos requisitos dos clientes (mercado). Requisitos, segundo Bhise (2014), definem as características dos produtos para alcançar seus objetivos específicos (função a ser realizada, nível de desempenho a ser alcançado, limites superior e inferior de especificação quanto a peso e dimensão, entre outros) para certas condições. Requisitos são desenvolvidos para atender as necessidades dos clientes, regulações governamentais e necessidades da empresa.

De acordo com Crowe (2001), a melhor maneira de entender os requisitos é conversar diretamente com o cliente. Apesar de muitos consumidores não especificarem seus requisitos diretamente, esses tem uma ótima ideia do que esperam de um produto ou serviço. O maior desafio do fabricante é traduzir os sentimentos e desejos dos clientes em produtos confiáveis.

Segundo Crowe (2001), os requisitos do uso normal de um produto são fáceis de entender, no entanto, o que é menos claro é o uso indevido de um produto. Um simples caso que a maioria das pessoas pode experimentar é, por exemplo, de um telefone celular cair no chão. O consumidor espera que o telefone resista a essa queda. No entanto, se cair da janela de um edifício o consumidor não espera que o telefone resista. Entender e definir esses tipos de requisitos é o fator principal para alcançar as expectativas e satisfação do cliente.

Portanto, para projetar e desenvolver um produto, é necessário definir os requisitos específicos e não específicos do consumidor.

Esses requisitos podem ser identificados realizando-se um plano de uso de vida do produto (do inglês *life-use plan*) (CROWE, 2001). O plano de uso de vida do produto

permitirá identificar como o produto será utilizado e quais os perigos de vida que é submetido, tais como exposições a diversas condições ambientais, quedas, uso inadequado, entre outros.

Crowe (2001) afirma ainda que, para entender os requisitos do cliente, as empresas comumente utilizam *Benchmarking* e Engenharia Reversa.

No *Benchmarking*, as tendências de mercado, a mais avançada tecnologia atual existente e a próxima tecnologia devem ser estudadas e entendidas. Esse processo pode fornecer onde e com qual velocidade a tecnologia está evoluindo. A partir dessas informações, os requisitos de um produto podem ser planejados, a fim de atender ou superar as expectativas dos clientes. Ao entender as deficiências de um produto, pode-se proporcionar oportunidades e recompensas em financiar os esforços de pesquisa e desenvolvimento. Além disso, o *Benchmarking* apoia metas de satisfação do cliente, fornecendo os produtos com agilidade, alta qualidade e baixo custo (CROWE, 2001).

A Engenharia Reversa, por sua vez, é definida como uma técnica que ajuda a melhorar o desempenho e confiabilidade dos produtos. Essa é realizada analisando o produto concorrente, desmontando-o cuidadosamente, e comparando-o com o projeto pretendido para cada componente. Na Engenharia Reversa, é avaliado como o produto concorrente foi utilizado em termos de vida útil, como foi construído para funcionar melhor em termos de confiabilidade, quantos componentes foram utilizados para atingir a meta de tempo médio entre falhas, a tecnologia utilizada no processo produtivo do produto, a facilidade de manutenção, os materiais utilizados para atingir os requisitos de qualidade, confiabilidade e custos (CROWE, 2001).

Essas avaliações são um grande passo para alcançar confiabilidade em produtos, transformando os resultados avaliados nos produtos concorrentes em novos produtos, facilitando o desenvolvimento de projetos competitivos.

Há, ainda, métodos complementares para o planejamento da confiabilidade de produtos. Segundo Crowe (2001), o método mais comum de previsões de confiabilidade é chamado de *bottom-up*, o qual consiste na estimativa da taxa de falhas para cada componente e, após, na combinação das taxas de falhas para todo o sistema. Essa metodologia utiliza uma configuração de diagrama de blocos no qual o sistema é desdobrado até o menor componente de interesse. A Figura 2.1 apresenta um exemplo desse diagrama.

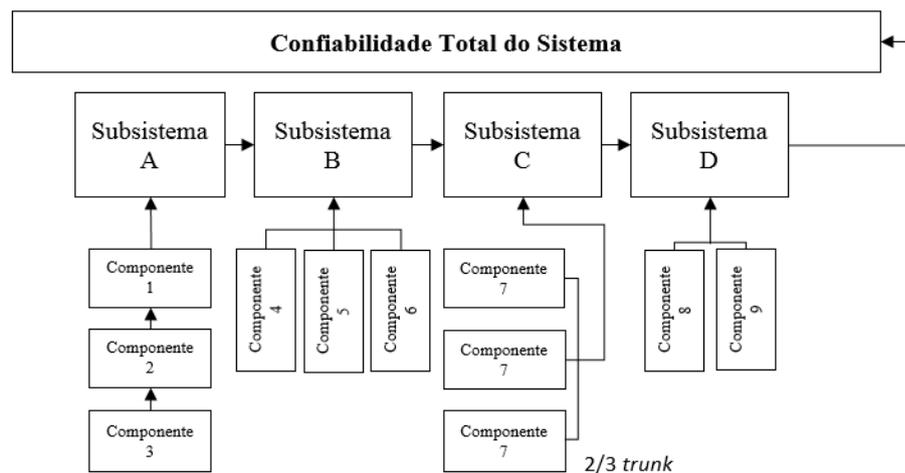


Figura 2.1: Diagrama de blocos de um dado sistema

Fonte: Crowe (2001)

A Figura 2.1 apresenta diversos tipos de configurações, os blocos A, B, C e D estão em série, 1, 2 e 3 em série, 4, 5 e 6 em paralelo, 7 em tronco (do inglês *trunk*) e 8 e 9 em paralelo. Em cada tipo de configuração, o método para determinar as taxas de falhas é diferente.

Uma vez que a taxa de falhas de cada componente é determinada, pode-se realizar a predição de confiabilidade para todo sistema.

Em posse da meta de confiabilidade para o sistema iniciam-se os estudos da alocação da confiabilidade do sistema em seus componentes. A próxima subseção apresenta a alocação ótima de confiabilidade.

2.2.1.2. ALOCAÇÃO DE CONFIABILIDADE

A alocação de confiabilidade (do inglês *Reliability Allocation*) em sistemas é definida por Aggarwal e Guha (1992) como uma maneira lógica de relacionar a taxa de falha de um sistema a seus componentes ou subsistemas. Chang et al. (2009) afirmam que a alocação de confiabilidade é um dos principais fatores para se determinar a confiabilidade e competitividade de um produto. Além disso, esses autores afirmam que a alocação é uma importante ferramenta de análise que pode ser utilizada para melhorar a confiabilidade de sistemas.

A alocação, de acordo com Guo et al. (2014), é considerada uma tarefa importante no *Design for Reliability (DfR)*, pois permite que se analisem os subsistemas individualmente para, após, se obter a confiabilidade de todo o sistema. O propósito da

alocação de confiabilidade é estabelecer uma meta de confiabilidade para cada unidade, componente ou subsistema do produto e, assim, garantir o alcance da confiabilidade para todo sistema (AGGARWAL e GUHA, 1992).

Wang et al. (2001) caracterizam a alocação de confiabilidade como uma tarefa difícil de ser realizada devido ao elevado número de fatores que devem ser avaliados durante o processo de desenvolvimento. Segundo Chen et al. (2012), a alocação de confiabilidade trata-se de um processo complicado e multicriterioso de decisão que envolve muitos fatores, tais como custos, desempenho, complexidade funcional e testes.

Usualmente o ciclo de desenvolvimento de dispositivos médicos e equipamentos militares é longo. Portanto, através de uma perspectiva de gerenciamento de projetos, a confiabilidade requerida para cada subsistema deve ser examinada o quanto antes. Alocar um requisito de confiabilidade para cada subsistema baseado nos requisitos do sistema é muito importante (GUO et al. 2014).

Para Chen et al. (2012), a confiabilidade de dispositivos médicos apresenta como fator crítico a segurança, a qual deve ser avaliada no início do desenvolvimento.

Guo et al. (2014) afirmam que muitos métodos de alocação de confiabilidade podem ser usados, tais como AGREE, *weighted*, *equal reliability* e métodos baseados em custos. É possível, de acordo com Mettas et al. (2000), estimar a confiabilidade mínima requerida para cada componente do sistema para atingir a confiabilidade meta do sistema com um mínimo custo.

O método de alocação de confiabilidade mais utilizado atualmente trata-se do *equal reliability allocation*. Esse método é utilizado para sistemas com configuração em série e propõe que todos os componentes apresentem o mesmo valor de confiabilidade (GUO et al. 2014).

Essa metodologia é basicamente exemplificada da seguinte maneira: suponha um sistema em série com três componentes independentes A, B e C.

A confiabilidade do sistema (R_S) é função das confiabilidades de cada componente e pode ser calculada de acordo com a equação 01.

$$R_S = R_A \times R_B \times R_C \quad \text{Equação (01)}$$

De acordo com essa metodologia as confiabilidades dos componentes são consideradas iguais, a equação 02 apresenta essa igualdade.

$$R_A = R_B = R_C \quad \text{Equação (02)}$$

Caso a confiabilidade requerida do sistema (R_S) seja 0,90, aplicando a equação 03 é possível calcular a confiabilidade de cada componente. A letra k na equação corresponde ao número de componentes do sistema.

$$R_A = R_B = R_C = (R_S)^{1/k} \quad \text{Equação (03)}$$

Para esse exemplo, a confiabilidade de cada componente é dada como $R_A = 0,90^{1/3}$, $R_B = 0,90^{1/3}$ e $R_C = 0,90^{1/3}$, portanto a confiabilidade requerida para os componentes A, B e C é de 0,9655. Isso irá assegurar que o sistema terá a confiabilidade desejada, igual a 0,90.

Além dessa metodologia mais usual, outras técnicas são utilizadas tais como: método do mínimo esforço ou ainda o método de alocação proporcional.

Segundo Ribeiro (2005), o método de alocação proporcional é aplicado após a primeira avaliação da confiabilidade dos componentes e do produto. Além disso, a metodologia é utilizada quando é observado que os componentes apresentam confiabilidades muito distintas. Essa metodologia permite que se aumente menos a confiabilidade dos componentes naturalmente mais fracos, e que se exija mais dos componentes naturalmente mais fortes.

A alocação proporcional de confiabilidade é basicamente exemplificada da seguinte maneira: Suponha um sistema em série com componentes independentes A, B e C. Primeiramente deve-se calcular a confiabilidade de cada componente. Suponha: $R_A = 0,75$, $R_B = 0,85$ e $R_C = 0,95$. Através desses resultados e utilizando a equação 01 chega-se a confiabilidade do sistema $R_S = 0,60$. Supondo que a confiabilidade requerida (R_{meta}) para o sistema seja de 0,90, deve-se elevar o valor atual $R_S = 0,60$ a uma potência y para que se atinja o valor meta $R_{meta} = 0,90$. A equação 04 apresenta essa relação.

$$R_S^y = R_{meta} \quad \text{Equação (04)}$$

Para esse exemplo, tem-se: $0,60^y = 0,90$. Portanto $y = 0,2062$.

Após, eleva-se a confiabilidade de cada componente na potência y (equação 05) e obtém-se, assim, a confiabilidade meta de cada componente ($R_{i\ meta}$).

$$R_{i\ meta} = R_i^y \quad \text{Equação (05)}$$

Seguindo o exemplo, $R_{A\ meta} = 0,75^{0,2062}$, $R_{B\ meta} = 0,85^{0,2062}$ e $R_{C\ meta} = 0,95^{0,2062}$, resultando assim em $R_{A\ meta} = 0,9424$, $R_{B\ meta} = 0,9670$ e $R_{C\ meta} = 0,9895$.

Por fim, para verificar se os valores meta dos componentes são apropriados para atingir o valor meta do sistema, utiliza-se novamente a equação 01, como apresentado abaixo:

$$R_S = 0,9424 \times 0,9670 \times 0,9895$$

$$R_S = 0,90$$

Outros métodos são utilizados para se obter maior precisão no valor de confiabilidade dos componentes e de acordo com a finalidade de uso do produto.

Guo et al. (2014) apresentam uma consideração de Níveis de Confiança (do inglês *Confidence Level*) para as seguintes metodologias: *equal reliability*, alocação baseada em custos e alocação baseada em riscos. Chen et al. (2012) apresentam uma metodologia de alocação de confiabilidade baseada em segurança com foco em dispositivos médicos. Yadav et al. (2014) apresentam uma metodologia que considera o potencial de melhoria dos subsistemas. Alven (1964) e Kececioglu (1991) utilizam o método *weight* de alocação de confiabilidade da *Aeronautical Radio Inc. (ARINC)*. Falcone et al. (2002) e Felice et al. (2001) apresentam a metodologia do fator integrado (do inglês, *Integrated Factor Method (IFM)*).

Existem, ainda, muitas outras metodologias que podem ser utilizadas dependendo dos recursos disponíveis e da precisão requerida.

Chen et al. (2012) destacam que a maioria das metodologias propostas são aplicadas a exemplos empíricos e que muitos questionamentos aparecem quando os pesquisadores tentam aplicar essas metodologias de alocação de confiabilidade nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto. Os autores apresentam o seguinte questionamento. Qual a precisão que a alocação de confiabilidade deve ter? Como apresentado anteriormente, a alocação de confiabilidade deve ser realizada nas fases iniciais dos projetos de desenvolvimento e, portanto, algumas informações tais como: especificações, número de componentes, custo e complexidade do produto podem não ser disponíveis. Além disso, as dependências entre os componentes são difíceis de modelar e, portanto, pode ser difícil alocar confiabilidade para cada componente do sistema de maneira precisa.

A metodologia de alocação de confiabilidade deve ser intuitiva e de fácil aplicação em empresas e em laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Uma metodologia mais compreensiva irá gerar melhores resultados se for bem entendida e implementada pelo usuário.

2.2.1.3. AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA CONFIABILIDADE

Através de estudos estatísticos, analisando-se as evidências quantitativas de operação do produto durante a vida útil esperada obtêm-se a quantificação da confiabilidade (MARTINS, 2011). A confiabilidade surge como um fator de desempenho aos sistemas, permitindo a análise do cumprimento dos parâmetros estipulados no desenvolvimento dos projetos ao longo do tempo previsto (RIBEIRO, 2014).

Abaixo são apresentados alguns parâmetros utilizados para avaliar a confiabilidade de um componente ou sistema:

MTBF: Tempo Médio Entre Falhas (utilizado para produtos que podem ser consertados).

MTTF: Tempo Médio Até a Falha (utilizado para produtos que não podem ser consertados).

θ : Vida Média em algumas unidades como horas ou ciclos

λ : Taxa de Falha em um período de tempo especificado

Por se tratar de uma probabilidade, verifica-se que a confiabilidade é determinada como um coeficiente entre 0 a 1. Assim, é conveniente que a mesma seja modelada por meio de distribuições de probabilidade (RIBEIRO, 2014).

Os modelos que possuem maior aplicação são os seguintes: Distribuição Exponencial, Distribuição Gamma, Distribuição de Weibull, Distribuição Lognormal e a Distribuição Normal. A distribuição de Weibull é atualmente a mais utilizada para modelar falhas oriundas de esforços cíclicos de fadiga.

A próxima subseção apresenta a distribuição de Weibull.

2.2.1.3.1. DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A origem da distribuição de Weibull é datada de 1939. Os créditos à sua análise e aplicabilidade são do pesquisador Waloddi Weibull que realizou estudos sobre o tempo de falha devido à fadiga de metais, e em 1951 pelo estudo “*A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*” com a aplicação do modelo para outros tipos de amostras, resistência à deformação e fadiga de aços, comprimento de fibras de algodão, estatura de homens adultos, entre outros (Haviaras, 2005).

Conforme Haviaras (2005), a utilização do modelo de Weibull mostra-se como o mais aderente na descrição do tempo de vida de sistemas formados por vários

componentes onde a falha ocorre quando um primeiro componente falhar, ou seja, como “uma corrente que falha como um todo, caso um de seus elos falhar”.

Ainda sob este mesmo enfoque, Haviaras (2005), menciona que a flexibilidade da distribuição de Weibull na descrição de processos aleatórios e a propriedade de permitir grande variedade de formas, torna o modelo bastante aderente às aplicações práticas.

A função de densidade de probabilidade e confiabilidade de Weibull são mostradas nas equações 06 e 07, respectivamente.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad \text{Equação (06)}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\gamma} \quad \text{Equação (07)}$$

Onde: γ é o parâmetro de forma, θ é o parâmetro de escala e t é o tempo.

Através dessa modelagem obtém-se a curva de confiabilidade *versus* o tempo esperado para toda a população. Além disso, obtém-se o valor do parâmetro de forma e do parâmetro de escala, os quais permitem a realização do cálculo da confiabilidade para um tempo específico, ou o cálculo do tempo para uma determinada confiabilidade, conforme equação 07.

2.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção, primeiramente, discorre sobre o produto médico-hospitalar que é objeto do estudo. Após, é apresentada a metodologia aplicada para o planejamento da confiabilidade do produto, alocação ótima de confiabilidade nos seus componentes e avaliação e modelagem da confiabilidade tanto dos componentes como do sistema na primeira fase do desenvolvimento do produto. Além disso, é apresentada uma breve descrição do projeto, fabricação, montagem e testes funcionais nos componentes do produto.

O método de pesquisa utilizado é caracterizado, quanto sua natureza, como pesquisa aplicada, pois os resultados serão utilizados imediatamente, visando à melhoria da confiabilidade de um produto médico. A pesquisa utiliza abordagem quantitativa, uma vez que as modelagens envolvem funções de probabilidade de falha e cálculos matemáticos. Quanto a seus objetivos, é caracterizada como pesquisa explicativa, uma vez que o modelo estabelecido descreve (explica) como a confiabilidade dos componentes afeta a confiabilidade do produto médico. Além disso, quanto aos seus procedimentos a pesquisa é caracterizada como pesquisa experimental, pois se apoia

fortemente em resultados de testes conduzidos em laboratório de desenvolvimento de produtos.

2.3.1. PRODUTO MÉDICO-HOSPITALAR OBJETO DO ESTUDO

Produtos médicos usualmente necessitam apresentar alta confiabilidade, pois desempenham funções relacionadas à vida de pacientes. A falha em dispositivos médicos pode ocasionar danos físicos aos pacientes. Assim, a empresa, por concepção legal, possui a obrigação de colocar no mercado um produto confiável e pagar pelas consequências em caso de mau funcionamento.

O estudo foi realizado em um dispositivo médico implantável classificado como produto inovador. O produto encontra-se em fase de desenvolvimento, mais especificamente, na etapa de testes laboratoriais (físicos/mecânicos e biológicos), avançando para a etapa de estudo clínico (estudo em pacientes).

O dispositivo não será identificado por questões de confidencialidade.

O produto é composto por cinco componentes de silicone conectados em série. Esses componentes são os seguintes: Alimentador A, Pressurizador P, Tanque de Armazenamento TA, Válvula V e Transferidor T. A Figura 2.2 apresenta o produto que, do ponto de vista de confiabilidade, constitui um arranjo em série.

Apesar deste tipo de arranjo dificultar a alocação e o alcance da meta de confiabilidade, não é possível inserir componentes redundantes ao produto, devido à restrição de tamanho que o produto deve apresentar.

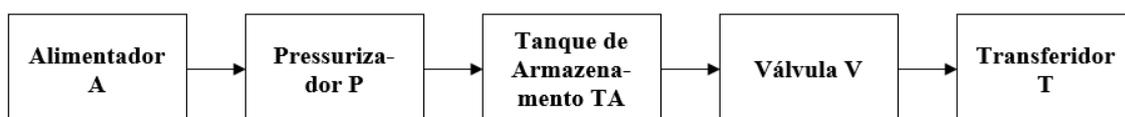


Figura 2.2: Dispositivo médico em seu arranjo em série

Fonte: Autor

Cada componente do sistema realiza uma determinada função. Essas funções são as seguintes:

- A: Componente responsável pela entrada do fluido no sistema;
- P: Componente responsável pela pressurização do sistema e funcionamento do componente V;
- TA: Componente responsável pelo armazenamento de fluido no sistema e funcionamento do componente V;

- V: Componente principal, garante a função principal do produto;
- T: Componente responsável pela transferência do fluido do componente V para o TA.

O produto deve ser utilizado pelo paciente por no mínimo cinco anos. Durante a utilização do produto, os componentes do sistema se desgastam devido, principalmente, a pressões internas ou compressões externas. Os componentes TA e V recebem pressões internas que acarretam em uma expansão de seu volume, enquanto os componentes P e T recebem cargas de compressão externa que acarretam em redução de volume. Tanto a pressão interna quanto a compressão externa causam expansão e compressão dos componentes de maneira cíclica. Portanto, os componentes TA, V, P e T se expandem e se contraem, ou vice versa, durante a utilização do produto, caracterizando um estresse por fadiga.

Apesar desses componentes realizarem contração e dilatação de forma cíclica, alguns componentes realizam maior número de ciclos do que outros. Para acionar o componente T são necessários três ciclos, e esse acionamento faz com que seja realizado um ciclo nos componentes TA e V e nenhum ciclo nos componentes A e P. Portanto, para o período de cinco anos de utilização, o componente T deverá resistir a um número três vezes maior de ciclos do que os componentes TA e V.

2.3.2. PLANEJAMENTO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CONFIABILIDADE

O planejamento da confiabilidade do produto médico-hospitalar objeto do estudo foi realizado da seguinte maneira: primeiramente foi realizado uma pesquisa de mercado para obtenção de dados iniciais a cerca dos requisitos, necessidades dos clientes e requisitos e regulamentações governamentais.

Após essa pesquisa, foram realizados estudos de *benchmarking* e engenharia reversa para entender a tecnologia mais atual comercializada no mercado e as novas tecnologias que estão sendo desenvolvidas. Através desses estudos foi possível definir as características funcionais e dimensionais, classe de risco, modo de uso, nível de desempenho a ser alcançado e o tempo de uso do produto.

A partir dessas informações, a estrutura do produto foi desenhada e, então, foi realizado o Estudo de Viabilidade Técnica Econômica (EVTE). No qual, foi verificada a viabilidade do projeto do novo produto em termos de Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e *Pay-Back*, considerando os investimentos requeridos em energia, ensaios, equipamentos, mão de obra, entre outros.

Em posse dos estudos técnicos de Pesquisa de Mercado, *Benchmarking* e Engenharia Reversa, foi possível estimar o número de acionamentos que cada um dos componentes do produto será submetido nos cinco anos de utilização do produto. Os números de acionamentos foram definidos com base em acionamentos diários e mensais conforme componente. Para o componente A, foi estimado um acionamento mensal, para P, um acionamento diário, para TA e V, cinco acionamentos diários e, para T, quinze acionamentos diários, o que corresponde a 60, 1.825, 9.125 e 27.375 acionamentos para cinco anos de uso e 120, 3.650, 18.250, 54.750 para 10 anos de uso, respectivamente.

Através dos estudos dos requisitos dos clientes, *Benchmarking* e Engenharia Reversa foram projetadas confiabilidades de 90% e 80% para cinco e dez anos de uso do produto, respectivamente. Sendo assim, espera-se que cerca de 10% dos pacientes necessitem substituir o produto antes de completarem-se os cinco anos e cerca de 20% antes de completarem-se os dez anos de uso. Nestes casos, se não for realizada a troca do produto, sua função será perdida, sabendo que uma falha por ruptura em qualquer componente ocasionará o vazamento do fluido do sistema e a necessidade de substituição emergencial, que pode trazer transtornos ao paciente.

A alocação ótima de confiabilidade, inicialmente, foi realizada baseada nas metas de confiabilidade de 90% e 80% para cinco e dez anos de uso do produto obtidas nos estudos técnicos. De posse desses valores e utilizando a equação 03, foi atribuído o valor de confiabilidade de 97,92% e 95,64% para cada componente do produto para cinco e dez anos de uso, respectivamente.

Caso os valores de confiabilidade dos componentes forem muito distintos, o método de alocação proporcional será utilizado para aumentar menos a confiabilidade dos componentes mais fracos e exigir mais dos componentes mais fortes.

2.3.3. PROJETO DOS COMPONENTES

Os componentes do produto foram projetados de acordo com os estudos técnicos previamente realizados, analisando os requisitos dos clientes, os estudos de *Benchmarking* e Engenharia Reversa.

Após esses estudos, iniciou-se o processo de desenvolvimento dos componentes, no qual foram realizados os desenhos dos componentes do produto e dos moldes para prototipagem. Nesse momento, algumas especificações técnicas tais como: dureza, espessura e área de colagem foram determinadas para cada um dos componentes do produto caracterizando, assim, o início da primeira fase do projeto.

2.3.4. FABRICAÇÃO E TESTES FUNCIONAIS DOS COMPONENTES

Os componentes do produto são fabricados através de diferentes processos produtivos, e cada componente possui um molde específico para sua fabricação. Detalhes do processo produtivo não serão abordados por questões de confidencialidade. Os processos produtivos que os componentes são submetidos são basicamente processos de conformação por compressão ou injeção com parâmetros de temperatura, pressão e tempo controlados.

Após a fabricação dos componentes do produto, esses foram direcionados aos testes funcionais. A reprodução dos acionamentos dos componentes do produto pelo paciente foi simulada em um ensaio de fadiga no qual os componentes, para absorverem as cargas internas, foram posicionados em equipamentos com pistões pneumáticos que comprimem e liberam o êmbolo de uma seringa que contém o fluido que deve ser utilizado no produto. Esse movimento cíclico tem como objetivo a injeção de fluido para expandir e liberar os componentes TA e V. Já para a absorção das cargas externas, os componentes P e T foram posicionados em equipamentos com pistões pneumáticos que comprimem e liberam os próprios componentes, de maneira cíclica.

O equipamento possui um painel de controle que indica a data, o horário e o número de ciclos realizados até a ruptura do componente, facilitando dessa maneira, o monitoramento e o registro do número de ciclos aplicados em cada amostra testada até o momento do rompimento. Estes dados foram armazenados em planilhas de registro de testes que informam o número da amostra testada e o número de ciclos que essa resistiu até a falha. Vale ainda ressaltar que alguns testes precisaram ser interrompidos antes do rompimento da amostra. Nestes casos, anotou-se o número de ciclos realizados até a interrupção do teste e trataram-se estes dados como dados censurados na modelagem da confiabilidade.

2.3.5. AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA CONFIABILIDADE

O cálculo de confiabilidade para os componentes do produto foram realizados a partir dos dados de falha obtidos através do monitoramento e registro dos testes, com auxílio do Software Proconf que possui em seu módulo de análise diversos modelos probabilísticos.

Os dados de tempo até a falha foram inseridos no Software Proconf e diferentes modelos foram testados. O modelo que melhor se adequou aos dados de falha, isto é,

apresentou o maior valor no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) foi adotado para a análise de confiabilidade do produto.

Após a definição do modelo, obteve-se a curva de confiabilidade *versus* o tempo de uso para cada um dos componentes do produto.

De posse da curva de confiabilidade *versus* tempo de uso dos componentes, foi determinada a confiabilidade dos componentes para cinco e dez anos de uso. Por tratar-se de um produto (sistema) que possui um arranjo em série foi calculada a confiabilidade total do produto para cinco e dez anos de uso utilizando a equação 01. Esses resultados foram confrontados com as metas de confiabilidade, conforme a alocação ótima, e para os componentes que não alcançaram suas metas, foram identificadas ações de melhoria. Essas ações de melhoria foram estabelecidas pela equipe de pesquisa e desenvolvimento de produtos que conta com três engenheiros e um gerente de desenvolvimento.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta, primeiramente, o número de acionamentos requeridos e a confiabilidade meta dos componentes, para cinco e dez anos de utilização do produto, baseados nos estudos de pesquisa de mercado, requisitos de clientes, *benchmarking* e engenharia reversa realizados nas fases de planejamento e alocação ótima de confiabilidade. Além disso, são apresentadas nessa seção as especificações técnicas dos componentes e a avaliação e modelagem da confiabilidade para a primeira fase do projeto.

A Tabela 2.1 apresenta o número de acionamentos requeridos e a confiabilidade meta de cada componente para cinco e dez anos de utilização do produto.

Componente	Cinco anos		Dez anos	
	Número de acionamentos	Confiabilidade meta (%)	Número de acionamentos	Confiabilidade meta (%)
Alimentador	60	97,92	120	95,64
Pressurizador	1.825	97,92	3.650	95,64
Tanque de Armazenamento	9.125	97,92	18.250	95,64
Válvula	9.125	97,92	18.250	95,64
Transferidor	27.375	97,92	54.750	95,64
Sistema		90,00		80,00

Tabela 2.1: Número de acionamentos e confiabilidade meta de acordo com o tempo de uso

De acordo com a Tabela 2.1, pode-se perceber que cada componente apresenta seu próprio número de acionamento ao longo dos anos. Isso acontece, pois cada

componente realiza uma determinada função independente. No entanto, a confiabilidade meta é a mesma para todos os componentes. Isso é devido à configuração do sistema. Por tratar-se de um sistema em série, a multiplicação das confiabilidades dos componentes deve resultar na confiabilidade de 90% e 80% do sistema para cinco e dez anos de uso, respectivamente.

De acordo com a função de cada componente do sistema, foram definidas as especificações técnicas para a primeira fase do projeto. Tais especificações podem ser visualizadas na Tabela 2.2. Essas especificações foram definidas de acordo com os estudos realizados nos produtos concorrentes, através do *know-how* da equipe de desenvolvimento e da disponibilidade de recursos.

Componentes	Dureza (Shore “A”)	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	75	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	20	0,50	5,00
Válvula	20	0,50	3,00
Transferidor	80	0,50	12,00

Tabela 2.2: Especificação dos componentes para primeira fase de projeto

Após essas definições, os componentes foram fabricados e devidamente testados, e os dados de falha registrados encontram-se nas Tabelas A1, A2, A3, A4 e A5 no Apêndice A dessa dissertação. Com estes dados, foi possível definir o modelo probabilístico para a análise da confiabilidade do produto.

O modelo probabilístico escolhido foi o de Weibull, pois esse apresentou maior valor no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) quando comparado aos modelos Exponencial e Gamma. Além disso, quando comparado ao modelo Lognormal e Normal, o modelo de Weibull apresentou maior valor para a maioria dos componentes. Nos componentes que Weibull não apresentou maior valor, a diferença do valor do teste de aderência foi pequeno, e optou-se por Weibull porque a literatura recomenda esse modelo em aplicações que envolvam fadiga de materiais.

A comparação entre os valores de K-S para cada modelo pode ser visualizado na Tabela 2.3.

Componentes	Exponencial	Weibull	Gamma	Lognormal	Normal
Alimentador	0,0001	0,2493	0,1810	0,2383	0,2483
Pressurizador	0,0001	0,0672	0,0067	0,0349	0,0753
Tanque	0,0001	0,0672	0,0067	0,0370	0,0792
Válvula	0,0059	0,2963	0,3247	0,2868	0,2951
Transferidor	0,0020	0,3159	-	-	0,0001

Tabela 2.3: Valores-p obtidos no teste de aderência de K-S para cada modelo probabilístico

Após a definição do modelo probabilístico, os valores de confiabilidade dos componentes e do sistema foram calculados para dez anos de utilização do produto. Esses valores são apresentados na Tabela 2.4. As confiabilidades dos componentes e do sistema (última coluna) foram calculadas utilizando-se o Software Proconf a equação 01, respectivamente.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67
2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,59	0,59
3	0,96	1,00	1,00	1,00	0,54	0,52
4	0,81	1,00	1,00	1,00	0,50	0,40
5	0,58	1,00	0,87	1,00	0,47	0,24
6	0,36	1,00	0,38	1,00	0,44	0,06
7	0,19	1,00	0,06	0,92	0,42	0,00
8	0,08	1,00	0,00	0,72	0,40	0,00
9	0,03	1,00	0,00	0,48	0,38	0,00
10	0,01	1,00	0,00	0,27	0,37	0,00

Tabela 2.4: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a primeira fase de projeto

Analisando os valores apresentados na Tabela 2.4, pode-se perceber que os componentes Alimentador, Tanque de Armazenamento e Transferidor não atingiram os valores meta de confiabilidade estabelecidos para cinco e dez anos de uso na primeira fase do projeto. Portanto, para esses componentes serão necessárias ações de melhoria. O componente denominado Válvula apresentou valor de confiabilidade superior à confiabilidade meta para cinco anos de uso, no entanto não atingiu o valor meta para dez anos e, assim como os outros três componentes, será submetido a ações de melhoria. Por

fim, o componente Pressurizador apresentou valor de confiabilidade superior à meta tanto para cinco, como para dez anos de utilização, não necessitando ações de melhoria.

Além disso, a confiabilidade do sistema está muito abaixo da confiabilidade meta devido, principalmente, a baixa confiabilidade dos componentes Alimentador e Transferidor.

Utilizando os valores encontrados na Tabela 2.4, os parâmetros de forma (γ), escala (θ) e localização apresentados na Tabela 2.5 e a equação 07, foram traçadas as curvas de confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* tempo de utilização do produto para cada componente. Essas curvas são apresentadas nas Figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7. A Figura 2.8 apresenta a curva de confiabilidade do sistema (produto) *versus* o tempo de utilização.

Componente	γ	θ	Localização
Alimentador	2,08	3,71	2,24
Pressurizador	2,55	9,43	20,70
Tanque de Armazenamento	2,50	1,86	4,16
Válvula	2,08	3,58	5,90
Transferidor	0,40	9,99	0,00

Tabela 2.5: Parâmetros de forma, escala e localização para a primeira fase de projeto

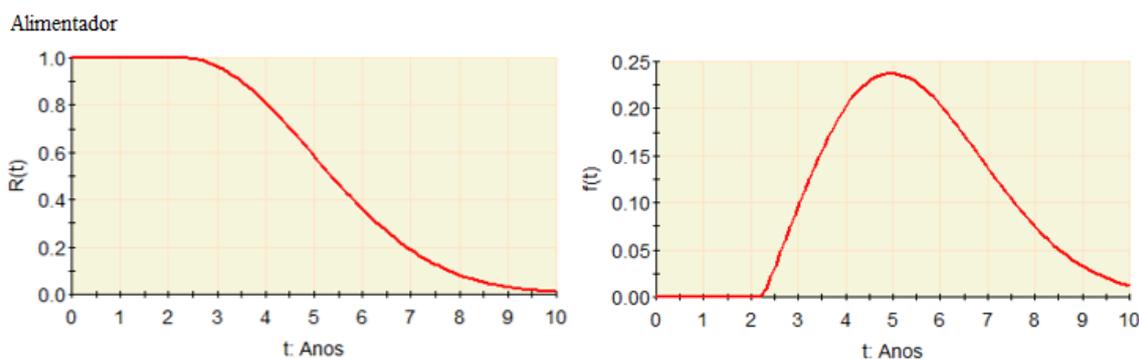


Figura 2.3: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Alimentador para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

Pressurizador

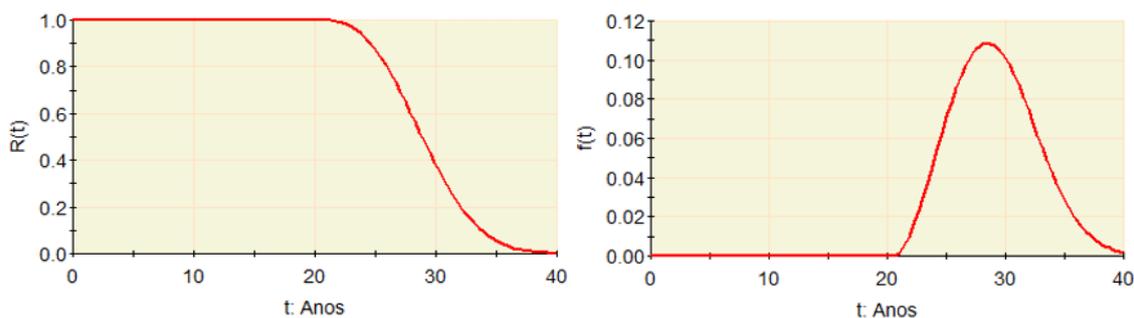


Figura 2.4: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Pressurizador para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

Tanque de Armazenamento

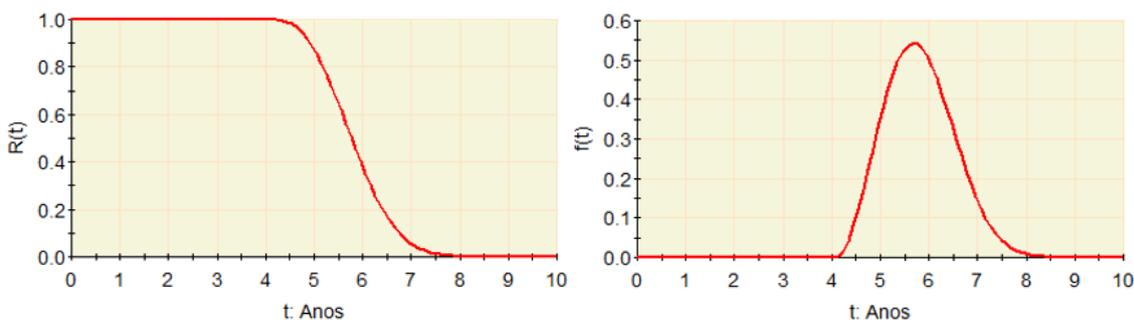


Figura 2.5: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

Válvula

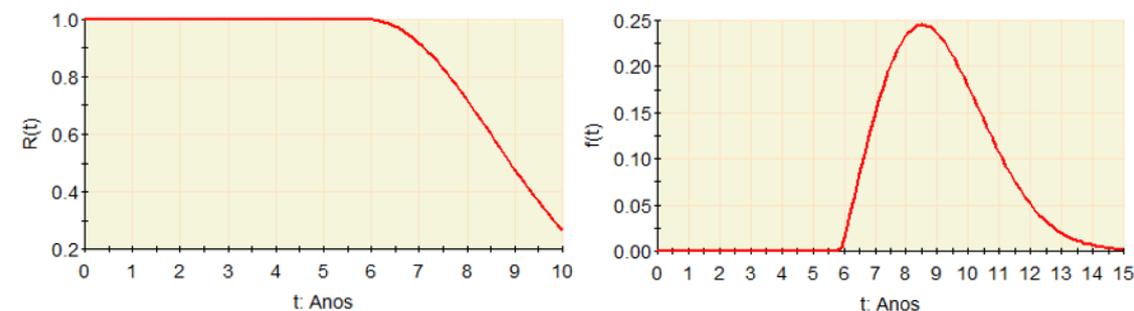


Figura 2.6: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para a Válvula para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

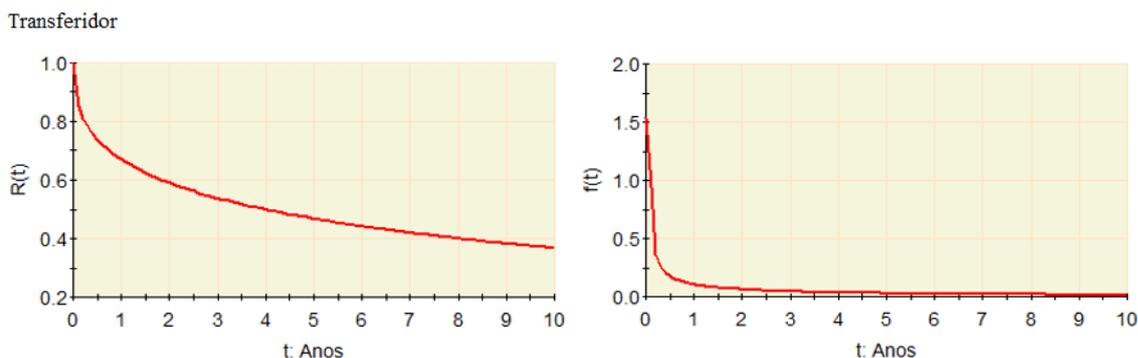


Figura 2.7: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Transferidor para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

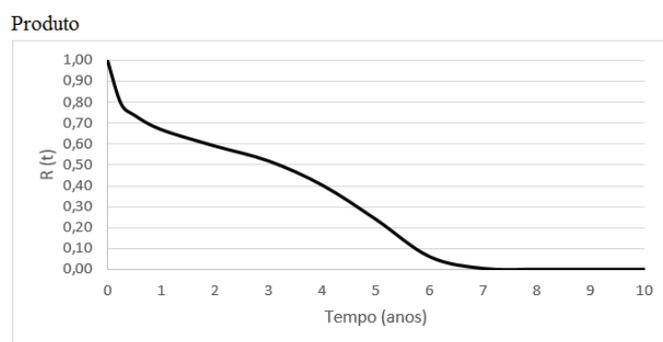


Figura 2.8: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização para a primeira fase de projeto

Fonte: Autor

Ao confrontar a curva de confiabilidade do sistema com a de seus componentes, pode-se perceber que o componente que mais influencia para a súbita queda na confiabilidade do produto antes do primeiro ano de uso é o Transferidor, sendo considerado dessa forma o componente crítico. Portanto, as ações de melhoria devem ser priorizadas nesse componente seguido do Alimentador, Tanque de Armazenamento e por fim a Válvula.

Além disso, o Transferidor apresenta taxa de falha decrescente, ou seja, apresenta falhas prematuras ocasionadas, principalmente, devido a problemas de montagem. Portanto, serão necessários, primeiramente, ajustes nas dimensões e área de colagem desse componente.

Analisando os valores da Tabela 2.4 pode-se perceber também, que os valores de confiabilidade dos componentes são muito distintos. Portanto, nesse momento, optou-se

pelo uso do método de alocação proporcional, que considera a confiabilidade atual para estabelecer a meta de confiabilidade.

Como a confiabilidade atual do sistema para cinco anos é $R_S = 0,24$, deve-se, de acordo com a equação 04, elevar a confiabilidade atual dos componentes na potência $y = 0,073$ para obter a confiabilidade meta do sistema $R_{meta} = 0,90$ para cinco anos de utilização. Da mesma forma, para 10 anos de utilização deve-se elevar a confiabilidade atual dos componentes na potência $y = 0,155$.

A nova confiabilidade meta dos componentes para cinco e 10 anos de uso foi calculada utilizando a equação 05 e está apresentada na Tabela 2.6.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Produto
5	0,9615	1,0000	0,9902	1,0000	0,9461	0,90
10	0,9190	1,0000	0,9786	1,0000	0,8896	0,80

Tabela 2.6: Confiabilidade meta para cinco e dez anos de utilização do produto

2.5. CONCLUSÃO

Este capítulo teve como tema o planejamento e avaliação da confiabilidade de um produto médico hospitalar durante sua fase de desenvolvimento. O tema foi discutido no âmbito do desenvolvimento de um novo produto através de um estudo aplicado nas fases de escopo, planejamento, prototipagem e avaliação inicial do produto. Essa primeira avaliação determinou o fim da primeira fase do projeto.

Os objetivos principais deste capítulo foram planejar a confiabilidade meta do produto, projetar e alocar confiabilidades ótimas aos componentes do produto e avaliar e modelar a confiabilidade atual dos componentes e do produto.

Para atingir os objetivos propostos na etapa de planejamento da confiabilidade e projeto dos componentes, apresentou-se uma metodologia composta por pesquisa de mercado, requisitos dos clientes, requisitos governamentais, *benchmarking* e engenharia reversa. Já para a etapa de alocação ótima de confiabilidade apresentou-se a metodologia clássica de alocação *equal reliability allocation* e a metodologia de alocação proporcional. Por fim, para a etapa de avaliação e modelagem da confiabilidade atual apresentou-se uma metodologia baseada nos dados de falha, em testes funcionais, dos componentes, os quais foram alimentados no software PROCONF para obtenção dos parâmetros de forma, escala, localização, curvas de confiabilidade e cálculo da confiabilidade dos componentes e do produto.

Os resultados obtidos com a implementação dessas metodologias permitiram que os responsáveis pelo projeto identificassem os componentes críticos do produto, isto é, componentes que apresentam menores valores de confiabilidade e necessitam de melhorias, além de avaliar a confiabilidade atual e identificar a distância entre a confiabilidade atual dos componentes e o valor planejado.

Quantitativamente, será necessário elevar a confiabilidade do Alimentador de 58% para 96,15%, do Tanque de Armazenamento de 87% para 99,02% e do Transferidor de 47% para 94,61% para os cinco anos de uso.

A implementação dessa metodologia contribuiu para o estabelecimento de um processo sistemático e adequado para o planejamento, alocação e avaliação da confiabilidade para ser utilizado no processo de desenvolvimento de novos produtos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que seja estudada a sistemática de gerenciamento do crescimento da confiabilidade do produto, estabelecendo-se uma metodologia para a implementação e acompanhamento de melhorias nas montagens e especificações dos componentes, em cada fase do projeto, a fim de elevar a confiabilidade dos componentes e do produto até o valor meta planejado.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, K. K; GUHA, S. Reliability Allocation in a General System with Non-Identical Components – A practical approach. **Microeletron. Reliab.** v. 33, n. 8, p. 1089–1093, Haryana, India, 1992.

ALVEN, W. H. **Reliability engineering prepared by ARINC research corporation.** Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1964.

BHISE, D. V. **Designing Complex Products with System Engineering Processes and Techniques.** Boca Raton: CRC Press, 2014. 462 p.

CHANG, Y; CHANG K; LIAW, C. Innovative Reliability Allocation Using the Maximal Entropy Ordered Weighted Averaging Method. **Computers and Industrial Engineering**, v. 57, p. 1274-1281, 2009.

CHEN, Q; WEI, Y; QIN, J. Software Reliability Allocation with Safety Concerns in Medical Devices. **IEEE Transactions on Reliability**, 2012.

CROWE, D. **Design for Reliability.** Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

FALCONE, D; SILVESTRI, A; BONA, D. **Integrated Factor Method (IFM): A New Reliability Allocation Technique.** In: Hamza MH, editor. SEA 2002: Proceeding of the IASTED International Conference on Software Engineering and Applications, Cambridge, USA, 2002. 166p.

FELICE, F. D; BONA, G. D; FALCONE, D; SILVESTRI, A. New Reliability Allocation Methodology: The Integrated Factors Method. **International Journal of Operations Quantitative Management**, v. 16, p. 67-85, 2001.

FOGLIATTO, S. F e RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2009.

GUIMARÃES, V. U. **Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GUO, H; Jiang, M; Wang, W. A Method for Reliability Allocation with Confidence Level. **IEEE Transactions on Reliability**, Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2014.

HAVIARAS, J. G. **Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook, vol 2**. Prentice Hall: Lancaster, Pennsylvania, 1991.

KIM, O. K; YANG, Y; ZUO, J. M. A New Reliability Allocation weight for reducing the occurrence of severe failure effects. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 117, p. 81-88, 2013.

LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: Prentice-Hall, 1995. 384 p.

MARTINS, R. T. **Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

METTAS, A. Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems. **IEEE Transactions on Reliability**, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.

RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Apostila do Curso de MBE em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade Industrial**. Notas de Aula. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 55 páginas, 2005.

WANG, Y; YAM, M. C. R; ZUO, J. M; TSE, P. A Comprehensive Reliability Allocation Method for Design of CNC Lathes. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, p. 247-252, 2001.

WASSERMAN, S. G. e SUDJANTO, A. A comparison of three strategies for forecasting warranty claims. **IIE Transactions**, v.28, p. 967-977, 1996.

YADAV, P. O; ZHUANG, X. A Practical Reliability Allocation Method Considering Modified Criticality Factors. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 129, p. 57-65, 2014.

3. GERENCIAMENTO DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE DE UM PRODUTO MÉDICO-HOSPITALAR DURANTE SUA FASE DE DESENVOLVIMENTO PARA OBTENÇÃO DA CONFIABILIDADE META

RESUMO

Este capítulo apresenta a importância do gerenciamento do crescimento da confiabilidade para a realização de melhorias ou reprojeto em componentes para o alcance da confiabilidade planejada para o produto ainda na fase de desenvolvimento. Estudou-se o planejamento do crescimento da confiabilidade de um produto médico-hospitalar através da construção da curva de crescimento, abrangendo metas intermediárias ao longo das fases de projeto. As melhorias ou reprojeto foram realizados através de um programa *test-fix-test*, no qual quando observado alguma falha durante os testes dos subsistemas, os mesmos foram interrompidos até que a melhoria ou o reprojeto fosse realizado. A avaliação e modelagem da confiabilidade em cada fase do projeto foram realizadas utilizando o modelo de Weibull, e os dados de falha dos componentes, observados em testes funcionais. Ao fim de cada fase de projeto foi realizado o controle de crescimento da confiabilidade, correlacionando os valores planejados com os valores realizados, a fim de gerenciar e realocar recursos. Por fim, foi realizada a análise dos resultados, onde verificou-se um aumento da confiabilidade de 24% para 100% para cinco anos de utilização do produto e de 0% para 83% para dez anos de utilização. Os valores finais de confiabilidade ultrapassaram os valores planejados, confirmando a eficiência da metodologia adotada.

PALAVRAS-CHAVE: gerenciamento do crescimento da confiabilidade, planejamento do crescimento da confiabilidade, controle do crescimento da confiabilidade, desenvolvimento de produtos, produto médico.

3.1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade de produtos e processos é um tema de grande importância em um contexto global. Atualmente, o tema confiabilidade está difundido em vários segmentos industriais. Independentemente do setor, as empresas estão enfrentando desafios para se manter competitivas no mercado globalizado, e um fator básico de decisão para o consumidor é a qualidade do produto ou serviço prestado (WASSERMAN E SUDJANTO, 1996).

Segundo Guimarães (2002), para que as empresas possam manter e/ou ampliar sua participação no mercado e alcançar a satisfação dos consumidores, é necessário que comercializem produtos que atendam os requisitos dos clientes e que apresentem elevada confiabilidade.

De acordo com Crowe (2001), para a obtenção do nível de confiabilidade desejado, é necessário estruturar um programa de gerenciamento do crescimento da

confiabilidade, do inglês *Reliability Growth Management*, durante a fase de desenvolvimento do produto. O gerenciamento do crescimento da confiabilidade, de acordo com Crowe (2001), é normalmente estabelecido através do planejamento sistemático das ações para o alcance da confiabilidade meta baseado em um cronograma onde os recursos e os riscos devem ser gerenciados. De acordo com AMSAA (2011), O gerenciamento do crescimento da confiabilidade, trata-se do processo de gerenciamento baseado no planejamento para o alcance da confiabilidade meta como função do tempo e de outros recursos. Além disso, no gerenciamento deve-se controlar a taxa de crescimento da confiabilidade, realocando recursos conforme a necessidade observada através da comparação da confiabilidade planejada com a alcançada em cada fase.

Considerando esse cenário, o tema geral deste capítulo é a confiabilidade, considerada um elemento essencial no projeto de desenvolvimento de um novo produto. O produto médico-hospitalar em silicone, objeto do estudo, foi apresentado no capítulo 2 dessa dissertação.

O tema específico deste capítulo trata do gerenciamento do crescimento da confiabilidade do produto durante sua fase de desenvolvimento. Esse tema é de suma importância no contexto competitivo atual, pois permite: planejar o valor meta de confiabilidade que o produto deve apresentar, avaliar a condição atual do produto, planejar o crescimento da confiabilidade ao longo das fases de projeto, promover o crescimento da confiabilidade durante as etapas de desenvolvimento através de melhoria ou reprojeto de componentes e atingir o valor de confiabilidade planejado. O objetivo geral deste trabalho pode ser enunciado como o gerenciamento do crescimento da confiabilidade para alcance da confiabilidade meta de um produto médico-hospitalar.

Esse capítulo está estruturado em cinco seções. Esta primeira seção (3.1) apresenta o contexto do estudo, objetivos e justificativa. Na segunda seção (3.2), é apresentado o referencial teórico a respeito de elastômeros de silicone e gerenciamento do crescimento da confiabilidade durante o desenvolvimento de novos produtos. A terceira seção (3.3) apresenta os procedimentos metodológicos para o gerenciamento do crescimento da confiabilidade. Os resultados e discussões do estudo são apresentados na seção quatro (3.4), seguido das conclusões na seção cinco (3.5).

3.2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção discorre sobre elastômeros de silicone para uso em produtos médicos e gerenciamento da confiabilidade em desenvolvimento de novos produtos.

3.2.1. ELASTÔMEROS DE SILICONE

Haja visto que todos componentes do produto em estudo são constituídos de silicone, nesta subseção serão apresentadas as principais características físicas e químicas do silicone, formas de comercialização e silicones para uso médico.

3.2.1.1. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DO SILICONE

No início do século XX, ficou provado que alguns materiais, até então conhecidos como colóides, consistiam, na verdade, de enormes moléculas que podiam resultar do encadeamento de 10.000 ou mais átomos de carbono. Esses produtos apresentavam repetições de pequenas unidades estruturais em sua longa cadeia principal e, assim, foram denominados de polímeros (MANO, 2000).

Dentre os polímeros, encontram-se os elastômeros, usualmente chamados de borracha. Os elastômeros são macromoléculas poliméricas que se diferenciam dos demais polímeros principalmente por sua elasticidade.

Segundo ROCHA et al. (2003), os elastômeros são divididos em famílias que possuem características específicas. A aplicação do produto final irá definir qual família deve ser utilizada no preparo dos compostos. Os termos borracha e elastômero usualmente possuem o mesmo significado e aplicam-se tanto às matérias-primas quanto aos produtos fabricados. Porém, a norma DIN 53501 define estes termos da seguinte maneira: as borrachas são polímeros não reticulados, mas reticuláveis (vulcanizáveis) que sob influência de forças de deformação demonstram um fluxo viscoso que os tornam capazes de serem moldados. A borracha é a matéria prima para a produção dos elastômeros. Os elastômeros são materiais poliméricos reticulados. Em condições de temperatura ambiente, apresentam comportamento elástico, a baixas temperaturas tornam-se quebradiços como o vidro e a altas não são sujeitos a fluxo viscoso.

Segundo ARAVANIS (2006), os elastômeros em geral possuem características próprias únicas, como a elasticidade, que é a capacidade que certas estruturas químicas possuem de sofrer grandes deformações mesmo quando submetidas a baixas tensões que, quando removidas, retornam quase que instantaneamente à condição inicial, sem perda significativa de forma e dimensões.

Entre os elastômeros se encontram os silicones, os quais tratam-se de elastômeros sintéticos que apresentam características e estrutura molecular não usual entre os

polímeros. A estrutura dos elastômeros consiste em uma cadeia de átomos de silício (aproximadamente 7.000) alternando com átomos de oxigênio.

Na Figura 3.1 é apresentada a molécula de Polidimetilsiloxano, que é o elastômero de silicone mais utilizado atualmente. A Figura 3.2 apresenta, de maneira mais detalhada, a molécula base denominada Dimetilsiloxano (BHOWMICK e STEPHENS, 1988).

Segundo Simpson (2002), polímeros que contém apenas as repetições da molécula apresentada na Figura 3.2 são denominados metil silicones e são designados pela ISO 1629 como MQ. A ISO 1629 designa como PMQ os elastômeros de silicones com um metil e um fenil de substituintes e VMQ os elastômeros com um metil e um vinil de substituintes (WHITE e DE, 2001).

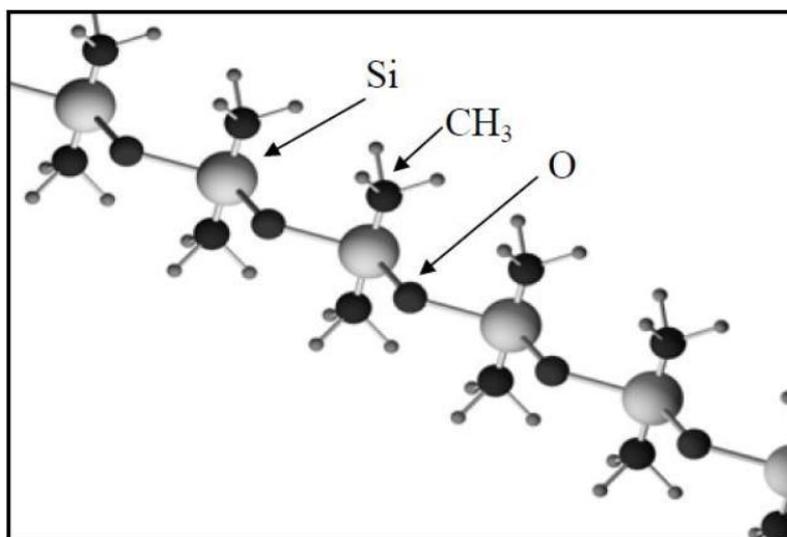


Figura 3.1: Estrutura molecular Polidimetilsiloxano

Fonte: Cosgrove et al. (2011).

Segundo Bhowmick e Stephens (1988), a ligação silício-oxigênio nos silicones é similar às ligações no quartzo e no vidro. No entanto, o silicone não é tão resistente ao calor quanto o quartzo, mas apresenta maior resistência ao calor comparado com outros elastômeros.

O silicone apresenta propriedades próprias, tais como: excelente estabilidade térmica a uma ampla faixa de temperaturas, resistência química, resistência ao ozônio e oxigênio, alta resistência a solvente e óleos, propriedades elétricas satisfatórias, isolamento elétrico, alta flexibilidade a baixas temperaturas, alta permeabilidade a gases,

excelente poder de vedação para líquidos, fácil descolagem de substratos orgânicos e cura a uma ampla faixa de temperaturas (BHOWMICK e STEPHENS, 1988). Além disso, a versatilidade na polimerização do silicone permite a fácil inclusão de diferentes grupos orgânicos que enriquecem essa lista de propriedades.

De acordo com Simpson (2002), é possível substituir poucos grupos metil (<0,5%), do átomo de silicone, por grupos vinil e o resultado do vinil metil silicone (VMQ) apresenta melhores características de vulcanização.

Elastômeros de silicone apresentam alta resistência ao envelhecimento por calor e são considerados para uso à temperaturas superiores a 200 °C. Além disso, ao ser comparado com outros elastômeros, o silicone mantém as propriedades em altas temperaturas, por muito mais tempo (SIMPSON, 2002).

Simpson (2002) afirma, ainda, que a performance do silicone ao longo do tempo é excelente.

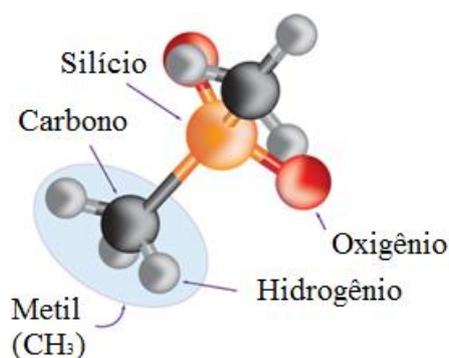


Figura 3.2: Molécula base Dimetilsiloxano

Fonte: Dow Corning (2016)

Segundo Bhowmick e Stephens (1988), o fator mais significativo para o elastômero de silicone possuir essa combinação de diversas propriedades é que esse possui ligações fortes em sua cadeia molecular, flexibilidade, fácil rotação dos grupos orgânicos, baixa força intermolecular e intramolecular. Além disso, os silicones, devido a sua pureza e propriedades químicas, oferecem excepcional inércia fisiológica e biocompatibilidade, o que permite a sua utilização em muitos produtos alimentícios, farmacêuticos e médicos, incluindo implantes (SIMPSON, 2002).

3.2.1.2. FORMAS DE COMERCIALIZAÇÃO

De acordo com Bhowmick e Stephens (1988) e Simpson (2002), o silicone é comercializado principalmente de quatro diferentes maneiras: composições de alta consistência (HSR – *High Silicone Rubber Compositions*), composições de silicone líquido (LSR – *Liquid Silicone Rubber Compositions*), composições que vulcanizam a temperatura ambiente (RTV – *Room Temperature Vulcanizing Compositions*) e composições que vulcanizam a altas temperaturas (HTV - *High Temperature Vulcanising Compositions*). As composições de alta consistência lideram o mercado mundial.

O silicone de alta consistência foi inicialmente produzido por volta de 1944. Os dois primeiros produtores da borracha de silicone foram a General Eletric (GE) e a Dow Corning Corporation, seguidos mais tarde por outros renomados fabricantes de materiais poliméricos, tais como Bayer, Rhodia e Wacker, que atualmente atendem quase toda demanda mundial.

Vários ingredientes são utilizados para fabricar o silicone, tais como: polímero de silicone, *crosslinker*, catalisador, pigmentos, aditivos contra envelhecimento, estabilizadores, espessantes, plastificantes entre outros (MORTON, 1987).

As exigências da engenharia de aplicações, principalmente nos campos da eletricidade, automotiva e aeroespacial, conduziram ao incremento das pesquisas de novas características dos elastômeros de silicone bem como de seus compostos e sistemas de cura, onde, atualmente são oferecidos ao mercado uma larga gama de tipos, não somente os vinil silicones, como também, fenil silicones e flúor silicones, que podem ser curados por peróxidos orgânicos ou variações de cura por platina (SIMPSON, 2002).

3.2.1.3. SILICONE PARA USOS MÉDICOS

Segundo Bhowmick e Stephens (1988), no início dos anos 50, muitos médicos e pesquisadores de universidades de medicina nos Estados Unidos, começaram a contatar a Dow Corning Corporation para obter informações sobre amostra de silicone para uso em suas pesquisas médicas. Em 1956, o Dr. R.R McGregor foi incumbido da tarefa de responder a vários pedidos de pesquisas e experimentos utilizando elastômeros de silicone. Em 1959, foi formado o Centro de Apoio a Pesquisas Médicas, que funcionava gratuitamente com o Dr. McGregor como diretor. Os pedidos e as despesas para a realização dessas pesquisas continuaram a aumentar até que em 1962 foi fundada uma empresa médica para custear esses serviços.

A partir de então, apoiado nas pesquisas realizadas, produtos de silicone, tais como próteses e bombas de sangue, por exemplo, passaram a ser fabricados para serem utilizados em diversas regiões internas ou externas do corpo humano, melhorando, assim, a qualidade de vida de diversas pessoas (BHOWMICK e STEPHENS, 1988).

3.2.2. GERENCIAMENTO DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE EM DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS

O crescimento da confiabilidade, do inglês *Realibility Growth*, trata da melhoria de um parâmetro de confiabilidade durante certo período de tempo, através de ações corretivas no projeto do produto, nos procedimentos de operação e manutenção ou ainda no processo de fabricação (AMSAA, 2011).

O gerenciamento do crescimento da confiabilidade, do inglês *Reliability Growth Management*, trata do processo de gerenciamento baseado no planejamento para o alcance da confiabilidade meta como função do tempo e de outros recursos. Além disso, no gerenciamento deve-se controlar a taxa de crescimento da confiabilidade, realocando recursos conforme a necessidade observada através da comparação da confiabilidade planejada com a alcançada em cada fase do projeto (AMSAA, 2011).

De acordo com Crowe (2001), o gerenciamento do crescimento da confiabilidade é normalmente estabelecido através do planejamento sistemático das ações para o alcance da confiabilidade meta baseado em um cronograma onde os recursos e os riscos devem ser gerenciados. O gerenciamento pode ser um fator significativo para o alcance da satisfação dos clientes.

Tradicionalmente, o gerenciamento do crescimento de confiabilidade pode ser utilizado para sistemas ou subsistemas. Isso se deve ao maior risco de desenvolvimento de novos produtos em comparação ao desenvolvimento de componentes. O programa de gerenciamento deve comunicar a possibilidade ou impossibilidade do alcance da confiabilidade meta para algum componente no tempo e custos requeridos. Um plano de ação é necessário para garantir o alcance da confiabilidade para os subsistemas e conseqüentemente para o sistema (CROWE, 2001).

O gerenciamento do crescimento da confiabilidade deve ser concebido antes das fases de teste para melhor planejamento dos recursos e para otimizar o aproveitamento das oportunidades de crescimento da confiabilidade. O objetivo dos testes iniciais é demonstrar a probabilidade de alcance da confiabilidade meta na fase de desenvolvimento

e, também, representar a efetividade da confiabilidade do produto em campo (KAMINSKI, 2013).

De acordo com AMSAA (2011), o processo de crescimento da confiabilidade é um processo iterativo de projeto que acontece através da descoberta e correções dos modos de falha.

Durante o desenvolvimento do projeto, são identificadas as falhas reais e as falhas potenciais em cada fase e, então, os esforços são direcionados para esses problemas. Os esforços de projeto podem ser aplicados tanto para desenvolvimento de produtos quanto para desenvolvimento de processos.

O modelo tradicional de gerenciamento do crescimento da confiabilidade é apresentado na Figura 3.3 que ilustra os elementos para o crescimento da confiabilidade. Esses elementos são: projeto dos subsistemas e sistema, planejamento da confiabilidade meta e do crescimento da confiabilidade, fabricação de protótipos dos subsistemas e do sistema, detecção das fontes de falha através de testes, identificação de problemas (causa-raíz), avaliação da confiabilidade atingida (atual) e aprovação e implementação das ações corretivas através do reprojeto dos subsistemas e sistemas (AMSAA, 2011).

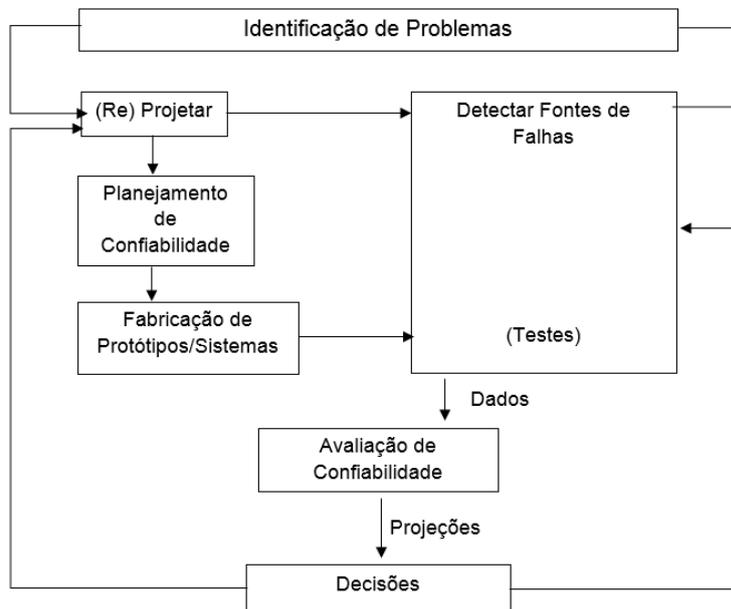


Figura 3.3: Modelo do processo de gerenciamento do crescimento da confiabilidade

Fonte: AMSAA (2011)

De acordo com o modelo apresentado na Figura 3.3, o crescimento da confiabilidade acontece através de um programa *test-fix-test* (testar-consertar-testar), no

qual os subsistemas são projetados, testados, as fontes de falha são detectadas, o subsistema é consertado ou reprojetoado e novamente testado.

De acordo com AMSAA (2011), o gerenciamento da confiabilidade é dividido em três áreas, essas são: planejamento do crescimento da confiabilidade do inglês *reliability growth planning*, controle do crescimento da confiabilidade do inglês *reliability growth tracking* e projeção do crescimento da confiabilidade do inglês *reliability growth projection*.

O planejamento do crescimento da confiabilidade basicamente possibilita: a criação de cronogramas, o projeto dos experimentos, a quantificação dos riscos, a verificação e programação da disponibilidade de recursos e a verificação da efetividade do programa de testes em alcançar os requisitos. Esse planejamento é efetivado quando a curva do planejamento do crescimento da confiabilidade é construída. Essa curva é importante, pois estabelece metas de confiabilidade intermediárias ao longo das fases de desenvolvimento e apresenta graficamente a expectativa de crescimento da confiabilidade durante cada fase de teste do desenvolvimento (AMSAA, 2011).

A Figura 3.4 apresenta a curva do planejamento do crescimento da confiabilidade ao longo das fases de projeto.

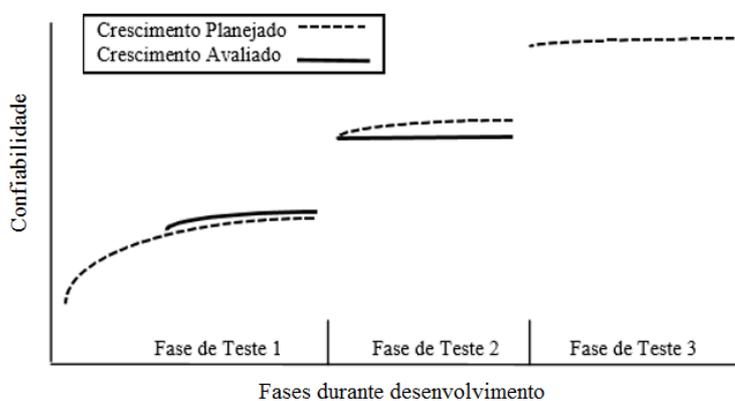


Figura 3.4: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade

Fonte: AMSAA (2011)

O planejamento do crescimento da confiabilidade bem elaborado pode servir como um instrumento de gestão importante na delimitação do âmbito dos recursos necessários para aumentar a confiabilidade do sistema e melhorar a probabilidade de alcançar a exigência de confiabilidade do sistema (AMSAA, 2011).

AMSAA (2011) apresenta cinco modelos que podem ser utilizados para o planejamento do programa de crescimento da confiabilidade para um sistema complexo, dependendo das circunstâncias de cada programa. Os modelos apresentados são: *Planning Model based on the Power Law* (AMSAA/Crow, Duane Postulate), *System Level Planning Model* (SPLAN), *Subsystem Level Planning Model* (SSPLAN), *Planning Model based on Projection Methodology* (PM2) e *Threshold Program* (TP).

O controle do crescimento da confiabilidade (*reliabilty growth tracking*) permite gerenciar o progresso dos esforços para alcançar a confiabilidade do sistema através dos resultados dos testes realizados. Esse controle é realizado para verificar se a confiabilidade está aumentando, isto é, se o crescimento está acontecendo com o decorrer do desenvolvimento e em qual taxa de crescimento. O controle do crescimento da confiabilidade fornece um método viável para combinar os dados de falha dos testes a fim de estimar a confiabilidade para a configuração atual (AMSAA, 2011).

De acordo com AMSAA (2011), é necessário que avaliações periódicas de confiabilidade sejam realizadas durante o programa de testes, usualmente no fim de cada fase de teste. Essas avaliações fornecem visibilidade e identificam deficiências enquanto ainda há tempo disponível para mudanças no projeto. Tomando decisões apropriadas a respeito da incorporação de ações corretivas no sistema, com o objetivo de atingir as exigências, o coordenador pode controlar o processo de crescimento da confiabilidade (SCHAEDLER, 2003). As confiabilidades avaliadas devem ser comparadas com as confiabilidades intermediárias planejadas. A comparação entre o valor planejado e alcançado irá demonstrar como o programa está evoluindo de acordo com o planejado.

Segundo AMSAA (2011), para o controle do crescimento da confiabilidade, os modelos são todos baseados na lei da potência (do inglês *power law*).

A projeção do crescimento da confiabilidade (*reliability growth projection*), de acordo com AMSAA (2011), fornece meios de estimar o valor de confiabilidade que deve ser atingido, quando todas as ações corretivas forem incorporadas ao sistema. O objetivo da projeção do crescimento da confiabilidade é obter uma estimativa da confiabilidade para o futuro baseada na estratégia de gerenciamento, planejamento, implementação de ações corretivas e dos resultados de testes atuais. Além disso, a projeção auxilia na determinação da maturidade do sistema ou subsistema através de métricas de maturidade como, por exemplo, o MTBF.

Para a projeção do crescimento de confiabilidade os modelos são baseados na lei da potência (*power law*) e AMSAA *maturity projection model* (AMPM) (AMSAA, 2011).

3.2.3. USOS DE MODELOS DE CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE

Esta subseção apresenta modelos que outros autores utilizaram para gerenciar o crescimento da confiabilidade.

Schaedler (2003) apresenta um estudo aplicado para o processo de gerenciamento da confiabilidade na empresa John Deere.

De acordo com Schaedler (2003), cada empresa desenvolve seu próprio programa de confiabilidade, de acordo com as necessidades e características de seus produtos. As empresas que possuem várias divisões de produtos, geralmente, desenvolvem planos de confiabilidade para cada linha de produtos.

A confiabilidade de produtos é de fundamental importância no desenvolvimento de novos produtos e no monitoramento dos produtos atuais. Desta forma, o processo de desenvolvimento de produtos utilizado, por exemplo, pela John Deere possui etapas específicas para o gerenciamento da confiabilidade em cada fase do desenvolvimento (SCHAEDLER, 2003).

De acordo com Schaedler (2003), a empresa em estudo apresenta um processo de desenvolvimento de produtos composto de seis fases distintas. Essas são:

- Elaboração do Planejamento Estratégico do Produto;
- Definição do programa;
- Avaliação e seleção do conceito;
- Desenvolvimento do programa;
- Confirmação e Implementação;
- Produção e Melhoria Contínua.

A Figura 3.5 apresenta a sequência e o relacionamento entre as seis fases mencionadas.



Figura 3.5: Processo de desenvolvimento de produtos John Deere

Fonte: Schaedler (2003)

Segundo Schaedler (2003), com a avaliação de vários programas de novos produtos, identificaram-se dois fatores principais que dificultam a redução de custos e o aumento da confiabilidade. Esses são: a baixa confiabilidade inicial de protótipos observada no começo do desenvolvimento dos testes e o pequeno crescimento da confiabilidade durante o desenvolvimento dos testes.

Essas dificuldades podem ser superadas utilizando técnicas avançadas de gerenciamento do crescimento da confiabilidade a serem utilizados desde o início do processo de desenvolvimento de produto. A Figura 3.6 apresenta as etapas do gerenciamento da confiabilidade propostas por Schaedler (2003).

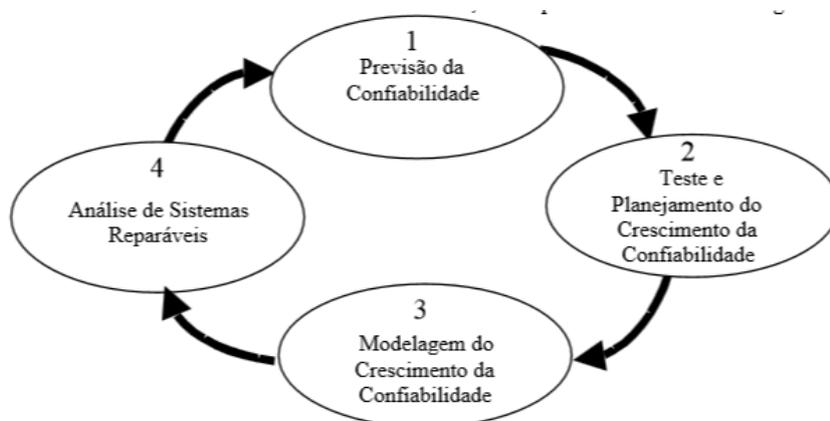


Figura 3.6: Etapas de gerenciamento da confiabilidade John Deere

Fonte: Schaedler (2003)

Schaedler (2003) utilizou em seu estudo aplicado às etapas de previsão da confiabilidade e análise de sistemas reparáveis. As etapas de planejamento e modelagem do crescimento da confiabilidade serviram, apenas, como orientações para o processo e não foram registradas.

Schaedler (2003) apresenta uma relação entre o processo de desenvolvimento de produto e o gerenciamento do crescimento da confiabilidade. A Figura 3.7 apresenta um diagrama com essa relação. O diagrama indica o momento em que deve ser utilizada cada uma das etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade no processo de desenvolvimento do produto.



Figura 3.7: Processo de desenvolvimento de produto e etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade John Deere

Fonte: Schaedler (2003)

As etapas de previsão da confiabilidade e testes e planejamento do crescimento da confiabilidade correspondem à área de planejamento do crescimento da confiabilidade. Enquanto, as etapas de modelagem do crescimento da confiabilidade e análise de sistemas reparáveis correspondem às áreas de controle e projeção do crescimento da confiabilidade.

Nas etapas de previsão da confiabilidade, teste e planejamento do crescimento da confiabilidade, modelagem do crescimento da confiabilidade e análise de sistemas reparáveis, Schaedler (2003) utiliza o modelo de AMSAA/Crow (1999).

Kaminski (2013) apresenta os modelos *System Level Planning Model (SPLAN)* e *Planning Model Based On Projection Methodology (PM2)*, para o planejamento efetivo das estratégias para o crescimento da confiabilidade em programas que estão no início das fases de desenvolvimento.

Por fim, Martins (2011) apresenta o gerenciamento do crescimento da confiabilidade para o alcance da confiabilidade meta de um motor diesel durante a fase de desenvolvimento. Além disso, apresenta o processo tradicional de desenvolvimento de produtos e ciclo de vida do produto no mercado.

3.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção, primeiramente, apresenta as especificações de projeto e a confiabilidade atual dos componentes e sistema identificados na primeira fase de teste. Após, é apresentada a metodologia de gerenciamento do crescimento da confiabilidade do produto que contempla o projeto dos subsistemas e sistema, planejamento do crescimento da confiabilidade, fabricação de protótipos dos subsistemas e do sistema, detecção das fontes de falha através de testes, identificação de problemas (causa-raíz), avaliação da confiabilidade atingida na respectiva fase do projeto, reprojeção dos subsistemas e sistemas e aprovação e implementação das ações corretivas.

O método de pesquisa utilizado é caracterizado, quanto sua natureza, como pesquisa aplicada, pois os resultados serão utilizados imediatamente, visando à melhoria da confiabilidade de um produto médico. A pesquisa utiliza abordagem quantitativa, uma vez que as modelagens envolvem funções de probabilidade de falha e cálculos matemáticos. Quanto a seus objetivos, é caracterizada como pesquisa explicativa, uma vez que o modelo estabelecido descreve (explica) como o gerenciamento do crescimento da confiabilidade dos componentes afeta a confiabilidade do produto médico. Além disso, quanto aos seus procedimentos a pesquisa é caracterizada como pesquisa experimental, pois se apoia fortemente em resultados de testes conduzidos em laboratório de desenvolvimento de produtos.

3.3.1. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO E CONFIABILIDADE ATUAL DO PRODUTO

O produto objeto do estudo foi previamente estudado no capítulo 2 dessa dissertação.

Através desse estudo, foram definidas as especificações técnicas dos componentes do produto (Tabela 3.1) e calculadas as confiabilidades dos componentes e do sistema (Tabela 3.2) para a primeira fase de projeto. Após, foram calculadas as confiabilidades meta dos componentes, apresentadas na Tabela 3.3, realizando a alocação ótima de confiabilidade através dos métodos *equal reliability allocation* e alocação proporcional previamente apresentados no capítulo 2.

Componentes	Dureza (Shore "A")	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	75	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	20	0,50	5,00
Válvula	20	0,50	3,00
Transferidor	80	0,50	12,00

Tabela 3.1: Especificação dos componentes para primeira fase de projeto

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67
2	1,00	1,00	1,00	1,00	0,59	0,59
3	0,96	1,00	1,00	1,00	0,54	0,52
4	0,81	1,00	1,00	1,00	0,50	0,40
5	0,58	1,00	0,87	1,00	0,47	0,24
6	0,36	1,00	0,38	1,00	0,44	0,06
7	0,19	1,00	0,06	0,92	0,42	0,00
8	0,08	1,00	0,00	0,72	0,40	0,00
9	0,03	1,00	0,00	0,48	0,38	0,00
10	0,01	1,00	0,00	0,27	0,37	0,00

Tabela 3.2: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para primeira fase de projeto

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Produto
5	0,9615	1,0000	0,9902	1,0000	0,9461	0,90
10	0,9190	1,0000	0,9786	1,0000	0,8896	0,80

Tabela 3.3: Confiabilidade meta para cinco e dez anos de utilização do produto

Confrontando os valores de confiabilidade para cinco e dez anos de utilização do produto na primeira fase do projeto (Tabela 3.2) com os valores de confiabilidade meta (Tabela 3.3), percebe-se que há a necessidade de realizar melhorias nos componentes para promover o alcance da confiabilidade meta.

Portanto, a próxima subseção apresenta a metodologia aplicada para o gerenciamento do crescimento da confiabilidade para alcance da confiabilidade meta.

3.3.2. GERENCIAMENTO DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE

O gerenciamento do crescimento da confiabilidade do produto em estudo é realizado baseado na metodologia tradicional apresentada na Figura 3.3.

As etapas de projeto dos subsistemas e sistema, planejamento da confiabilidade meta, fabricação, testes e avaliação da confiabilidade para a primeira fase do projeto foram apresentadas no capítulo 2 dessa dissertação.

A partir do estudo realizado, iniciam-se as etapas de planejamento do crescimento da confiabilidade do sistema, conserto ou reprojeto dos subsistemas, fabricação de novos protótipos, realização de testes para a identificação dos problemas e avaliação da confiabilidade dos subsistemas e sistema para cada fase do projeto.

3.3.2.1. PLANEJAMENTO DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE

O planejamento do crescimento da confiabilidade inicia-se com a construção da curva de crescimento. Essa curva é construída através da análise de projetos de desenvolvimento semelhantes anteriores, o que é possível, pois a empresa desenvolve produtos médico-hospitalares de silicone desde 1980 e, portanto, apresenta expertise na área.

A curva do crescimento apresenta metas intermediárias de confiabilidade para o fim de cada fase de projeto. Além disso, a curva do planejamento do crescimento deve ser utilizada para o controle do crescimento ao longo das fases de projeto, ou seja, para a comparação do executado com o planejado.

3.3.2.2. FABRICAÇÃO E TESTES FUNCIONAIS DOS SUBSISTEMAS

O roteiro para fabricação e testes funcionais dos subsistemas é idêntico ao apresentado na subseção 2.3.4 dessa dissertação.

O programa de testes utilizado para o produto em estudo foi o *test-fix-test* (testar-consertar-testar), pois, ao observar uma falha durante os testes dos subsistemas, os mesmos são interrompidos até que a mudança no projeto seja realizada. Quando os testes forem retomados, os subsistemas já apresentarão um incremento na confiabilidade.

3.3.2.3. AVALIAÇÃO E MODELAGEM DA CONFIABILIDADE

O roteiro para a avaliação e modelagem da confiabilidade é idêntico ao apresentado na subseção 2.3.5 dessa dissertação.

3.3.2.4. CONSERTO OU REPROJETO DOS SUBSISTEMAS

A etapa de conserto ou reprojeto dos subsistemas tem como objetivo eliminar as fontes de falha (causa-raíz), detectadas na etapa de testes e na etapa de identificação de problemas, através de modificações nas especificações de projeto do produto.

Para a identificação da causa-raíz, diversas ferramentas da qualidade podem ser utilizadas. Entre essas estão o *brainstorming* com os especialistas do produto, o diagrama de causa e efeito (Ishikawa), os cinco porquês, entre outras.

O conserto ou o reprojeto deve ser realizado após uma avaliação de riscos, para que a mudança não resulte em novos problemas. A avaliação dos riscos pode ser realizada através de uma Análise de Modo e Efeito de Falha do inglês *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), na qual as falhas potenciais em qualquer parte do subsistema devem ser analisadas para determinar o efeito dessas nas outras partes do sistema e no provável sucesso operacional, tendo como objetivo melhorias no projeto e no produto.

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta, primeiramente, o planejamento do crescimento da confiabilidade baseado na análise de projetos de desenvolvimento semelhantes. Além disso, apresenta as especificações do produto e a avaliação e modelagem da confiabilidade em cada fase do desenvolvimento.

O planejamento do crescimento da confiabilidade é realizado primeiramente através da construção da curva de crescimento. Essa curva foi desenvolvida estipulando valores meta de confiabilidade intermediários, ao fim de cada fase de projeto. Através da análise do histórico de projetos de desenvolvimento semelhantes realizados na empresa foram planejadas quatro fases de projeto para alcance da confiabilidade meta para os cinco anos e cinco fases para os dez anos de uso do produto. Foram definidos para o fim da primeira, segunda, terceira e quarta fase confiabilidades meta de 25%, 50%, 75% e 90%, respectivamente, para os cinco anos de utilização do produto. Já para as cinco fases de projeto para os dez anos de uso foram definidos valores de 10%, 20%, 45%, 70% e

80%. As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam a curva de planejamento do crescimento para cinco e dez anos de uso do produto, respectivamente.

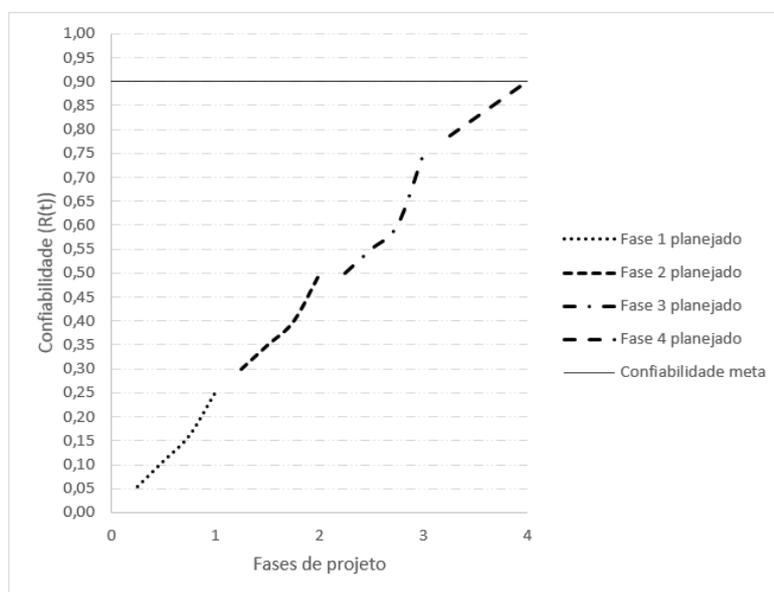


Figura 3.8: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade, para cinco anos de uso, ao longo das fases de projeto

Fonte: Autor

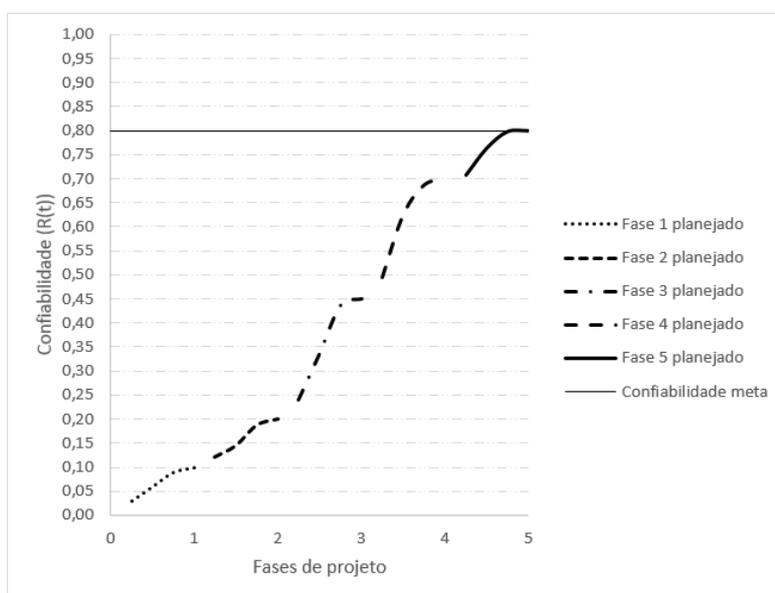


Figura 3.9: Curva de planejamento do crescimento da confiabilidade, para dez anos de uso, ao longo das fases de projeto

Fonte: Autor

Após a construção das curvas de planejamento do crescimento e realização da análise dos valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a primeira fase do projeto, apresentados na Tabela 3.2, verificou-se a necessidade de reprojeto dos componentes.

O Transferidor foi o componente que apresentou menor confiabilidade para os cinco anos de uso do produto, portanto, esse componente será priorizado em relação ao demais. Além disso, o Transferidor apresentou taxa de falhas decrescente, ou seja, apresenta falhas prematuras ocasionadas, principalmente, devido a problemas de montagem. Portanto, foi identificado que serão necessários ajustes nas especificações do componente. A primeira mudança será realizada na área de colagem do componente, passando de 12,00 mm para 13,00 mm. Essa especificação foi priorizada em relação às demais, visto que o componente apresenta problemas de montagem, isto é, encaixe e colagem. Para tal modificação é necessário realizar o reprojeto das matrizes de fabricação do componente.

O componente Alimentador tem a função de membrana para que o fluido entre no sistema e não retorne. Portanto, foi realizada a identificação da causa-raiz do problema de vazamento e verificou-se que a causa mais provável é a alta dureza do material. Resultando assim, em baixa flexibilidade. Esse componente, com essa especificação, ao receber cargas cíclicas se deforma plasticamente e perde sua função de vedação. A fim de solucionar o problema de vazamento, foi iniciado o reprojeto do componente, modificando a dureza de 75 Shore “A” para 60 Shore “A” e mantendo as outras especificações fixas.

O Tanque de Armazenamento apresentou um valor de confiabilidade de 87% para cinco e 0% para 10 anos de utilização. Além disso, verificou-se que a confiabilidade diminui rapidamente a partir do quinto ano. Foi então realizada uma análise minuciosa nos componentes testados e foi identificado o rompimento na região da colagem. A fim de solucionar o problema, o componente foi reprojetoado com uma maior área de colagem. A área que era de 5,00 mm na primeira fase de projeto, passou a ser 6,00 mm e as outras especificações foram mantidas.

A Válvula apresentou confiabilidade de 100% para os cinco anos de utilização do produto, no entanto não atingiu a confiabilidade meta para os 10 anos de uso. Portanto foi realizada a análise dos componentes e identificou-se rompimento no corpo do componente e, portanto, a provável causa-raiz é a espessura do componente. O componente foi reprojetoado passando de 0,50 mm de espessura para 0,60 mm.

O componente Pressurizador alcançou na primeira fase de projeto o valor máximo de confiabilidade (100%) para os cinco e dez anos de uso do produto, portanto, não serão necessárias ações corretivas nesse componente.

Realizando uma Análise de Modo e Efeito de Falhas, foi constatado que nenhuma das alterações propostas, para cada componente, apresenta riscos aos demais componentes do sistema.

A Tabela 3.4 apresenta a especificação dos componentes para a segunda fase do projeto.

Componentes	Dureza (Shore “A”)	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	60	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	20	0,50	6,00
Válvula	20	0,60	3,00
Transferidor	80	0,50	13,00

Tabela 3.4: Especificação dos componentes para segunda fase de projeto

Após a definição das novas especificações e reprojeção dos componentes, esses foram produzidos e devidamente testados. Os dados de falha registrados encontram-se nas Tabelas A6, A7, A8 e A9 no Apêndice A dessa dissertação. Com esses dados, os valores de confiabilidade dos componentes e do sistema foram calculados para dez anos de utilização do produto. Esses valores são apresentados na Tabela 3.5. A confiabilidade do sistema (última coluna) foi calculada utilizando a equação 01, previamente apresentada na subseção 2.2.1.2 dessa dissertação.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,89
5	0,99	1,00	0,95	1,00	0,61	0,57
6	0,90	1,00	0,85	1,00	0,41	0,32
7	0,71	1,00	0,72	1,00	0,28	0,14
8	0,49	1,00	0,55	1,00	0,19	0,05
9	0,28	1,00	0,39	1,00	0,12	0,01
10	0,14	1,00	0,24	0,80	0,08	0,00

Tabela 3.5: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a segunda fase do projeto

Analisando os valores apresentados na Tabela 3.5, pode-se perceber que os componentes Tanque de Armazenamento e Transferidor não atingiram os valores meta de confiabilidade estabelecidos para cinco e dez anos de uso na segunda fase do projeto. No entanto, com as ações realizadas o Tanque passou de 87% para 95% de confiabilidade para cinco anos e de 0% para 24% para dez anos de utilização do produto. Representando um aumento percentual de 9,20% para cinco anos de utilização.

O Transferidor apresentou um aumento de 47% para 61% de confiabilidade para cinco anos de utilização do produto, representando assim, um aumento percentual de 29,78%. Para os dez anos de utilização do produto, o Transferidor apresentou uma redução de 37% para 8% na confiabilidade. Essa redução não deve ser avaliada de maneira negativa, visto que, com a modificação realizada os componentes se apresentaram mais padronizados e, comparando a primeira e a segunda fase do projeto, percebe-se uma redução significativa no valor do desvio padrão dos dados de falha do componente.

Os componentes Alimentador e Válvula apresentaram valores de confiabilidade superiores à confiabilidade meta para cinco anos de uso, no entanto não atingiram o valor meta para dez anos e, assim como os outros dois componentes, serão submetidos a ações de melhoria. Analisando os valores de confiabilidade da primeira para a segunda fase de projeto, o Alimentador passou de 58% para 99% de confiabilidade para cinco anos de utilização, resultando em um aumento percentual de 70,69%. Além disso, apresentou um aumento de 1% para 14% de confiabilidade para 10 anos de utilização. A Válvula apresentou um aumento de confiabilidade de 27% para 80% para 10 anos de utilização, ou seja, aumento percentual de 196,30%.

Por fim, o componente Pressurizador já havia apresentado valor de confiabilidade superior à meta tanto para cinco, como para dez anos de utilização, na primeira fase do projeto e, portanto, não necessita ações de melhoria.

A confiabilidade do sistema aumentou de 24% para 57% para cinco anos de uso do produto. Significando um aumento percentual de 137,50%. No entanto, ainda está abaixo da confiabilidade meta, principalmente, devido à baixa confiabilidade do componente Transferidor.

Utilizando os valores encontrados na Tabela 3.5, os parâmetros de forma (γ), escala (θ) e localização apresentados na Tabela 3.6 e a equação 07, previamente apresentada na subseção 2.2.1.3.1, foram traçadas as curvas de confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* tempo de utilização do produto para cada componente que foi

reprojetado. Essas curvas são apresentadas nas Figuras A1, A2, A3 e A4 no Apêndice B dessa dissertação. As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam a curva de confiabilidade do sistema *versus* o tempo de utilização do produto e a comparação entre a curva de confiabilidade do produto para a primeira e segunda fase do projeto, respectivamente.

Componente	γ	θ	Localização
Alimentador	2,19	4,00	4,56
Pressurizador	2,55	9,43	20,70
Tanque de Armazenamento	2,54	6,02	3,09
Válvula	1,45	2,94	8,94
Transferidor	1,03	2,58	3,71

Tabela 3.6: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para segunda fase do projeto

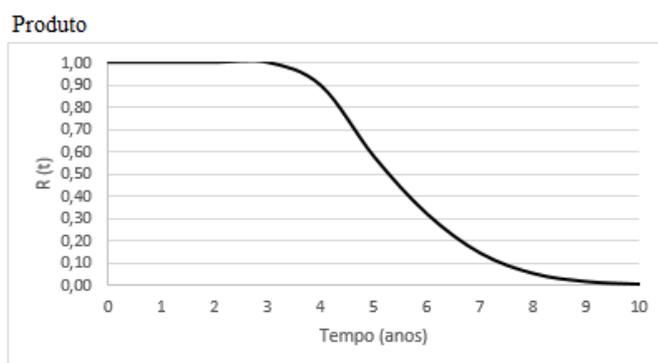


Figura 3.10: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização na segunda fase de projeto

Fonte: Autor

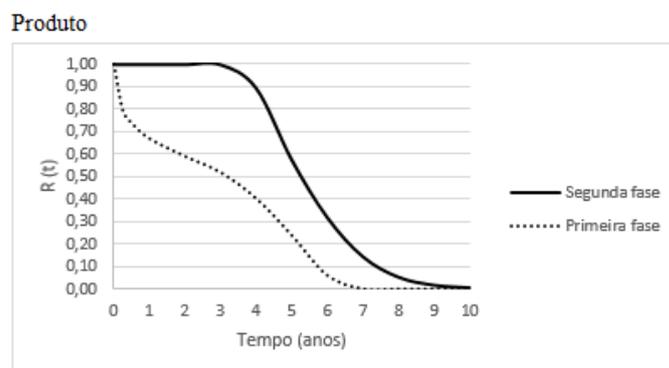


Figura 3.11: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização para a primeira e segunda fase de projeto

Fonte: Autor

Analisando as Figuras 3.10 e 3.11 pode-se perceber que houve um aumento significativo da confiabilidade do produto para todos os anos de utilização. Além disso, a confiabilidade para a segunda fase se manteve constante em 100% até o terceiro ano de utilização do produto. Verifica-se ainda que as taxas de falha são crescentes ao longo dos anos, portanto, o problema de montagem do componente Transferidor foi eliminado.

A Figura 3.12 apresenta a curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira e segunda fase de projeto para cinco anos de uso. Analisando a Figura 3.12 pode-se perceber que o crescimento da confiabilidade para a primeira e segunda fase do desenvolvimento é superior ao planejado, ou seja, as modificações que foram realizadas nos componentes do produto apresentaram desempenho superior ao planejado. Já para os dez anos de uso do produto a confiabilidade ficou em 0% e, portanto, inferior ao planejado.

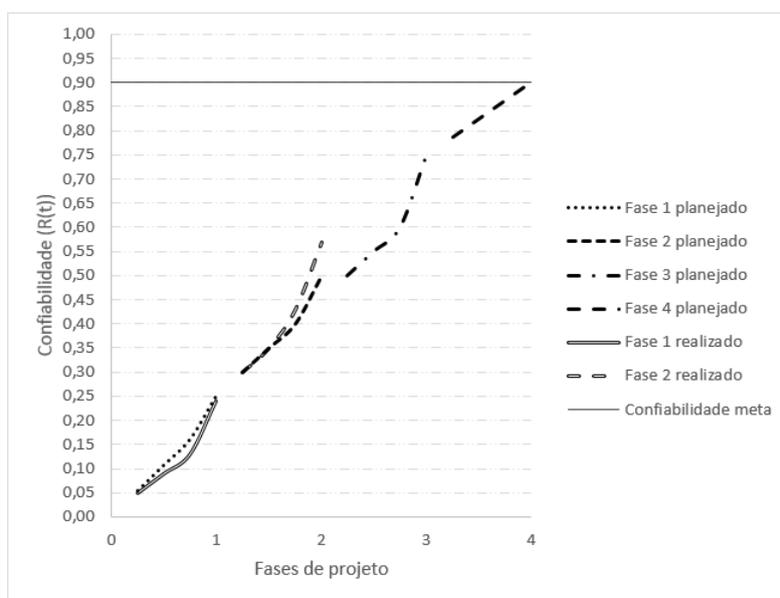


Figura 3.12: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira e segunda fase de projeto

Fonte: Autor

De acordo com a Figura 3.10 e 3.12 verifica-se que a confiabilidade do sistema para cinco e dez anos de utilização ficou aquém da meta planejada, portanto, será necessário realizar uma nova fase de projeto.

Essa nova fase de projeto tem como objetivo aumentar, primeiramente, a confiabilidade do Transferidor e do Tanque para cinco anos de utilização. Os demais componentes necessitam de acréscimo na confiabilidade para 10 anos de utilização.

Para a realização do acréscimo de confiabilidade dos componentes foi realizado, de maneira análoga a primeira e segunda fase do projeto, uma análise de causa-raiz para o problema de vazamento. Foi identificado que nessa fase, o Transferidor, o Tanque e o Alimentador apresentam vazamento devido sua dureza, ou baixa flexibilidade. Portanto, foi definida a redução da dureza de 80 para 60 Shore “A”, de 20 para 15 Shore “A” e de 60 para 50 Shore “A” para o Transferidor, Tanque e Alimentador, respectivamente. Essa modificação é mais rápida de ser realizada, visto que trata-se de uma mudança apenas na formulação do componente.

A Válvula por sua vez, necessita de uma modificação na espessura passando de 0,60 mm para 0,70 mm. A Tabela 3.7 apresenta as especificações para a terceira fase de projeto.

Realizando uma Análise de Modo e Efeito de Falhas, foi constatado que nenhuma das alterações propostas, para cada componente, apresenta riscos aos demais componentes do sistema.

Componentes	Dureza (Shore “A”)	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	50	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	15	0,50	6,00
Válvula	20	0,70	3,00
Transferidor	60	0,50	13,00

Tabela 3.7: Especificação dos componentes para terceira fase de projeto

Após a definição das novas especificações e reprojeção dos componentes, esses foram produzidos e devidamente testados. Os dados de falha registrados encontram-se nas Tabelas A10, A11, A12 e A13 no Apêndice A dessa dissertação. Com esses dados, os valores de confiabilidade dos componentes e do sistema foram calculados para dez anos de utilização do produto. Esses valores são apresentados na Tabela 3.8. A confiabilidade do sistema (última coluna) foi calculada utilizando a equação 01, previamente apresentada na subseção 2.2.1.2.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86	0,86
6	1,00	1,00	1,00	1,00	0,61	0,61
7	1,00	1,00	1,00	1,00	0,41	0,41
8	1,00	1,00	1,00	1,00	0,26	0,26
9	1,00	1,00	0,95	1,00	0,16	0,15
10	0,92	1,00	0,72	1,00	0,09	0,06

Tabela 3.8: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a terceira fase do projeto

Analisando os valores apresentados na Tabela 3.8, pode-se perceber que o Transferidor não atingiu o valor meta de confiabilidade estabelecido para cinco e dez anos de uso na terceira fase do projeto. No entanto, apresentou um aumento de 61% para 86% de confiabilidade para cinco anos de utilização do produto, representando assim, um aumento percentual de 40,98%. Para os dez anos de utilização do produto, o Transferidor apresentou um aumento de 8,00% para 9,00% na confiabilidade.

Através das ações realizadas o Tanque passou de 95% para 100% de confiabilidade para cinco anos e de 24% para 72% para dez anos de utilização do produto. Representando um aumento percentual de 5,26% e de 200,00% para cinco e dez anos, respectivamente.

Os componentes Alimentador e Válvula apresentaram valores de confiabilidade superiores à confiabilidade meta para cinco e dez anos de uso. Analisando os valores de confiabilidade da segunda para a terceira fase de projeto, o Alimentador passou de 99,00% para 100,00% de confiabilidade para cinco anos de utilização, resultando em um aumento percentual de 1,01%. Além disso, apresentou um aumento de 14,00% para 92,00% de confiabilidade para dez anos de utilização. A Válvula apresentou um aumento de confiabilidade de 80,00% para 100,00% para dez anos de utilização, ou seja, aumento percentual de 25,00%.

A confiabilidade do sistema aumentou de 57% para 86% para cinco anos de uso do produto, significando um aumento percentual de 50,88%. No entanto, ainda está abaixo da confiabilidade meta, principalmente, devido ao componente Transferidor.

Utilizando os valores encontrados na Tabela 3.8, os parâmetros de forma (γ) e escala (θ) e localização apresentados na Tabela 3.9 e a equação 07, previamente

apresentada na subseção 2.2.1.3.1, foram traçadas as curvas de confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* tempo de utilização do produto para cada componente que foi reprojeto. Essas curvas são apresentadas nas Figuras A5, A6, A7 e A8 no Apêndice B dessa dissertação.

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam a curva de confiabilidade do sistema *versus* o tempo de utilização do produto para terceira fase de projeto e a comparação entre a curva de confiabilidade do produto para a primeira, segunda e terceira fase do projeto, respectivamente.

Componente	γ	θ	Localização
Alimentador	2,05	4,06	8,81
Pressurizador	2,55	9,43	20,70
Tanque de Armazenamento	3,84	3,51	7,37
Válvula	6,37	4,29	8,15
Transferidor	1,27	2,86	4,37

Tabela 3.9: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para terceira fase do projeto

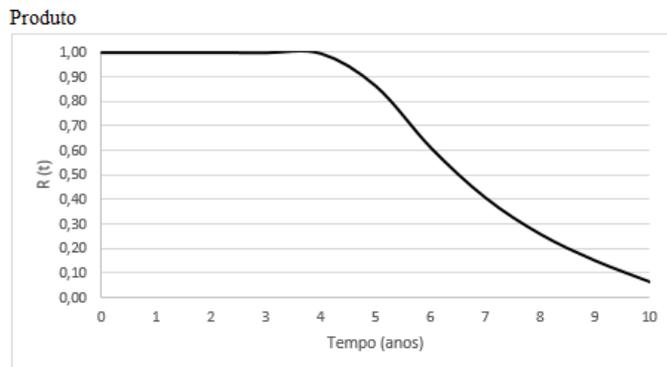


Figura 3.13: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização na terceira fase de projeto

Fonte: Autor

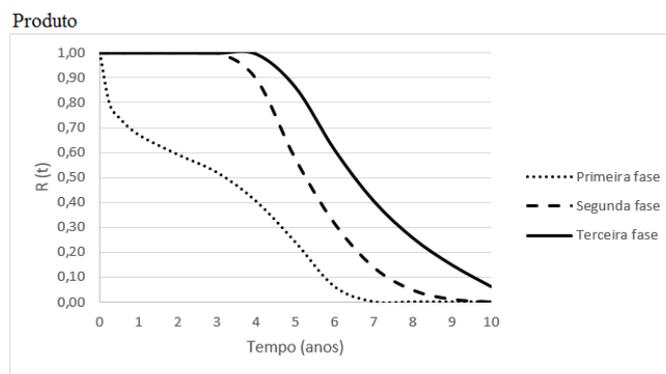


Figura 3.14: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização para a primeira, segunda e terceira fase de projeto

Fonte: Autor

Analisando as Figuras 3.13 e 3.14 pode-se perceber que houve um aumento significativo da confiabilidade do produto para todos os anos de utilização. Além disso, a confiabilidade para a terceira fase se manteve constante em 100% até o quarto ano de utilização do produto.

A Figura 3.15 apresenta a curva de controle do crescimento da confiabilidade para a terceira fase de projeto para cinco anos de uso. Analisando a Figura 3.15 pode-se perceber que o crescimento da confiabilidade para a terceira fase do desenvolvimento é superior ao planejado. Já para os dez anos de uso do produto a confiabilidade ficou em 6,00% e, portanto, inferior ao planejado, conforme apresentado na Figura 3.16.

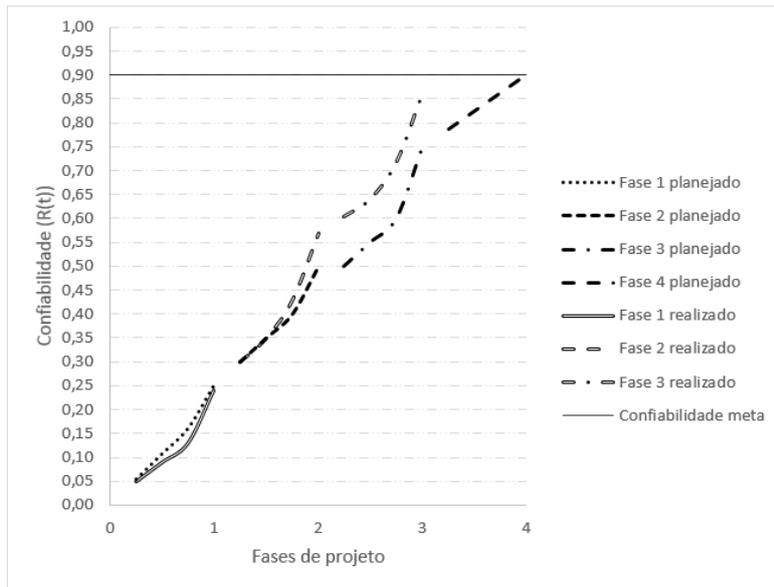


Figura 3.15: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda e terceira fase de projeto para cinco anos de uso

Fonte: Autor

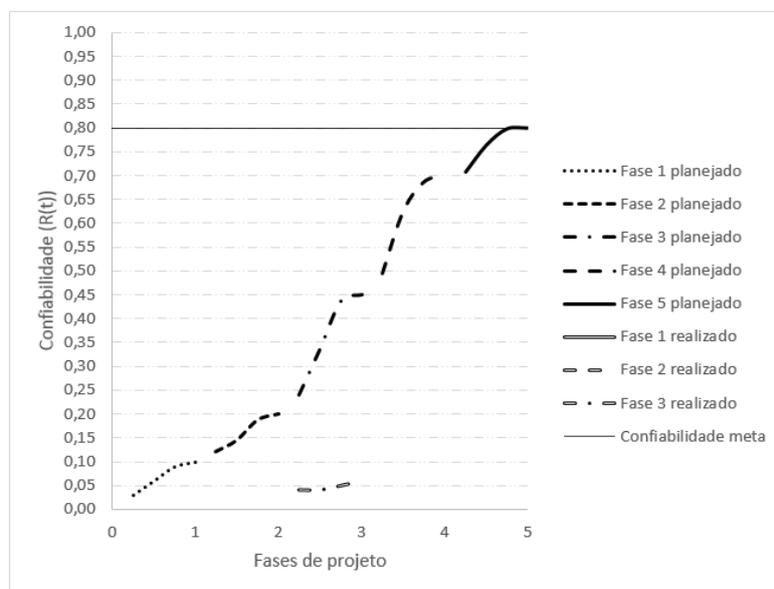


Figura 3.16: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda e terceira fase de projeto para dez anos de uso

Fonte: Autor

A confiabilidade do sistema para cinco e dez anos de utilização ficou aquém da meta planejada, portanto, será necessário realizar uma nova fase de projeto.

Essa quarta fase de projeto tem como objetivo aumentar, primeiramente, a confiabilidade do Transferidor para cinco e dez anos de utilização. Após, aumentar a confiabilidade do Tanque para dez anos de utilização.

Para a realização do acréscimo de confiabilidade dos componentes foi realizado, de maneira análoga à primeira, segunda e terceira fase do projeto, uma análise de causa-raiz para o problema de vazamento. Foi identificado que nessa fase, o Transferidor, o Tanque apresentam vazamento devido sua dureza, ou baixa flexibilidade. Portanto, foi definida a redução da dureza de 60 para 55 Shore “A” e de 15 para 12 Shore “A” para o Transferidor e Tanque, respectivamente.

A Tabela 3.10 apresenta as especificações para a quarta fase de projeto.

Realizando uma Análise de Modo e Efeito de Falhas, foi constatado que nenhuma das alterações propostas, para cada componente, apresenta riscos aos demais componentes do sistema.

Componentes	Dureza (Shore “A”)	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	50	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	12	0,50	6,00
Válvula	20	0,70	3,00
Transferidor	55	0,50	13,00

Tabela 3.10: Especificação dos componentes para quarta fase de projeto

Após a definição das novas especificações e reprojeto dos componentes, esses foram produzidos e devidamente testados. Os dados de falha registrados encontram-se nas Tabelas A14 e A15 no Apêndice A dessa dissertação. Com esses dados, os valores de confiabilidade dos componentes e do sistema foram calculados para dez anos de utilização do produto. Esses valores são apresentados na Tabela 3.11. A confiabilidade do sistema (última coluna) foi calculada utilizando a equação 01, previamente apresentada na subseção 2.2.1.2.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	0,87
9	1,00	1,00	1,00	1,00	0,72	0,72
10	0,92	1,00	0,98	1,00	0,58	0,53

Tabela 3.11: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a quarta fase do projeto

Analisando os valores apresentados na Tabela 3.11, pode-se perceber que o Transferidor apresentou um aumento de 86% para 100% de confiabilidade para cinco anos de utilização do produto, representando assim, um aumento percentual de 16,28%. Para dez anos de uso, o Transferidor apresentou aumento de 9,00% para 58,00% de confiabilidade. No entanto, não atingiu o valor meta de confiabilidade estabelecido.

Através das ações realizadas o Tanque passou de 72,00% para 98,00% de confiabilidade para os dez anos de utilização do produto. Representando um aumento percentual de 36,11% e atingindo sua meta de confiabilidade.

A confiabilidade do sistema aumentou de 86% para 100% para cinco anos de uso do produto, atingindo assim a confiabilidade meta de 90% para cinco anos. Já para dez anos de uso, a confiabilidade não chegou ao valor meta estabelecido apesar de ter um acréscimo de 6,00% para 53,00%.

Utilizando os valores encontrados na Tabela 3.11, os parâmetros de forma (γ), escala (θ) e localização apresentados na Tabela 3.12 e a equação 07, previamente apresentada na subseção 2.2.1.3.1, foram traçadas as curvas de confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* tempo de utilização do produto para cada componente que foi reprojeto. Essas curvas são apresentadas nas Figuras A9 e A10 no Apêndice B dessa dissertação.

As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam a curva de confiabilidade do sistema *versus* o tempo de utilização do produto para a quarta fase do projeto e a comparação entre a curva de confiabilidade do produto para a primeira, segunda, terceira e quarta fase do projeto, respectivamente.

Componente	γ	θ	Localização
Alimentador	2,05	4,06	8,81
Pressurizador	2,55	9,43	20,70
Tanque de Armazenamento	1,12	0,78	9,98
Válvula	6,37	4,29	8,15
Transferidor	1,19	4,91	7,09

Tabela 3.12: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para quarta fase de projeto

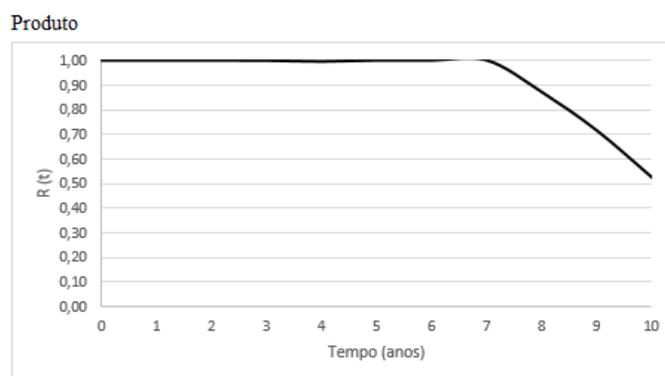


Figura 3.17: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização na quarta fase de projeto

Fonte: Autor

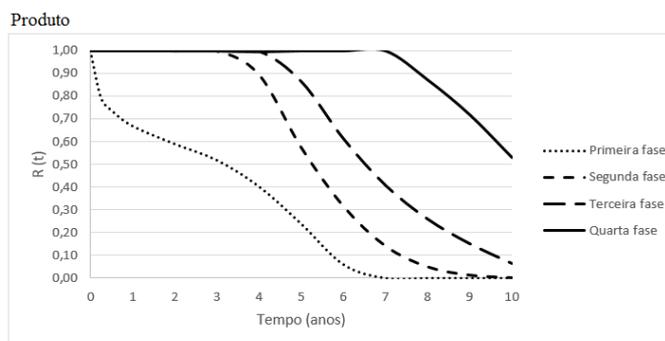


Figura 3.18: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto

Fonte: Autor

Analisando as Figuras 3.17 e 3.18, pode-se perceber que houve um aumento significativo da confiabilidade do produto para todos os anos de utilização. Além disso,

a confiabilidade para a quarta fase se manteve constante em 100% até o sétimo ano de utilização do produto.

A Figura 3.19 apresenta a curva de controle do crescimento da confiabilidade para a quarta fase de projeto para cinco anos de uso. Analisando a Figura 3.19, pode-se perceber que o crescimento da confiabilidade para a quarta fase do desenvolvimento foi superior ao planejado e o produto atingiu a confiabilidade meta de 90%. Já para os dez anos de uso do produto a confiabilidade ficou em 53,00% e, portanto, inferior ao planejado, conforme apresentado na Figura 3.20.

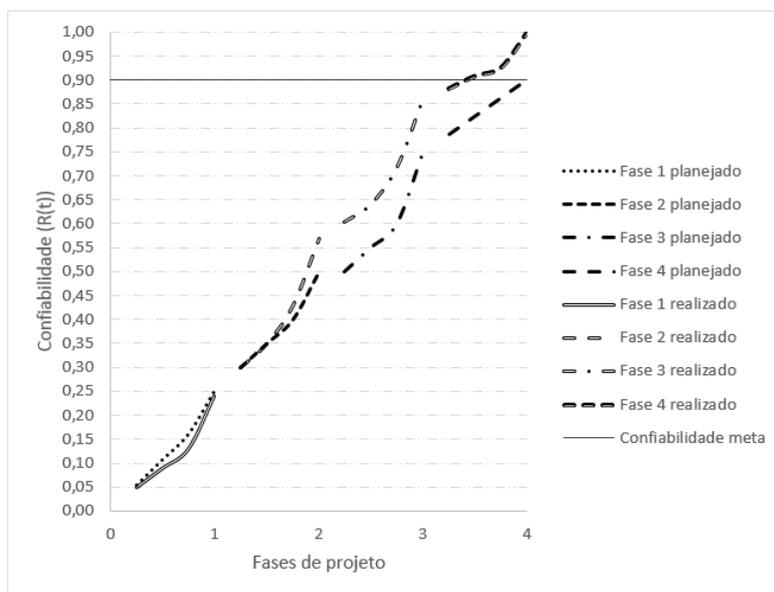


Figura 3.19: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto para cinco anos de uso

Fonte: Autor

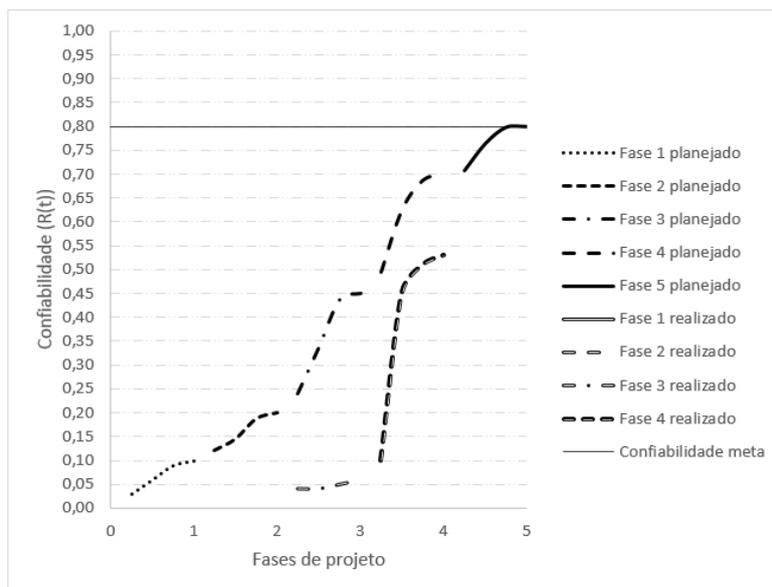


Figura 3.20: Curva de controle do crescimento da confiabilidade para a primeira, segunda, terceira e quarta fase de projeto para dez anos de uso

Fonte: Autor

A confiabilidade do sistema para dez anos de utilização ficou aquém da meta planejada, portanto, será necessário realizar uma nova fase de projeto.

Essa quinta fase de projeto tem como objetivo aumentar a confiabilidade do Transferidor para dez anos de utilização.

Para a realização do acréscimo de confiabilidade desse componente foi realizado, de maneira análoga à primeira, segunda, terceira e quarta fase do projeto, uma análise de causa-raiz para o problema de vazamento. Foi identificado que nessa fase, o Transferidor apresenta vazamento devido sua dureza. Portanto, foi definida a redução da dureza de 55 para 50 Shore “A”.

A Tabela 3.13 apresenta as especificações para a quinta fase de projeto.

Realizando uma Análise de Modo e Efeito de Falhas, foi constatado que a alteração proposta não apresenta riscos aos demais componentes do sistema.

Componentes	Dureza (Shore “A”)	Espessura (mm)	Área de colagem (mm)
Alimentador	50	3,00	4,00
Pressurizador	20	0,50	5,00
Tanque de Armazenamento	12	0,50	6,00
Válvula	20	0,70	3,00
Transferidor	50	0,50	13,00

Tabela 3.13: Especificação dos componentes para quinta fase de projeto

Após a definição da nova especificação e reprojetado do componente, esse foi produzido e devidamente testado. Os dados de falha registrados encontram-se na Tabela A16 no Apêndice A dessa dissertação. Com esses dados, os valores de confiabilidade do componente e do sistema foram calculados para dez anos de utilização do produto. Esses valores são apresentados na Tabela 3.14. A confiabilidade do sistema (última coluna) foi calculada utilizando a equação 01, previamente apresentada na seção 2.2.1.2.

Ano	Alimentador	Pressurizador	Tanque	Válvula	Transferidor	Sistema
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	0,92	1,00	0,98	1,00	0,92	0,83

Tabela 3.14: Valores de confiabilidade dos componentes e do sistema para a quinta fase do projeto

Analisando os valores apresentados na Tabela 3.14, pode-se perceber que o Transferidor atingiu o valor meta de confiabilidade estabelecido para dez anos de uso na quinta fase do projeto. Apresentando um aumento de 58,00% para 92% de confiabilidade, representando assim, um aumento percentual de 58,62%.

A confiabilidade do sistema aumentou de 53,00% para 83,00% para dez anos de uso do produto, atingindo assim a confiabilidade meta de 80% para dez anos.

Utilizando os valores encontrados na Tabela 3.14, os parâmetros de forma (γ), escala (θ) e localização apresentados na Tabela 3.15 e a equação 07, previamente apresentada na subseção 2.2.1.3.1, foram traçadas as curvas de confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* tempo de utilização do produto para o componente reprojetado. Essa curva é apresentada na Figura A11 no Apêndice B dessa dissertação.

As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam a curva de confiabilidade do sistema *versus* o tempo de utilização do produto para a quinta fase do projeto e a comparação entre a curva de confiabilidade do produto para todas as fases do projeto, respectivamente.

Componente	γ	θ	Localização
Alimentador	2,05	4,06	8,81
Pressurizador	2,55	9,43	20,70
Tanque de Armazenamento	1,12	0,78	9,98
Válvula	6,37	4,29	8,15
Transferidor	4,75	1,69	9,00

Tabela 3.15: Parâmetros de forma, escala e localização de cada modelagem para quinta fase de projeto

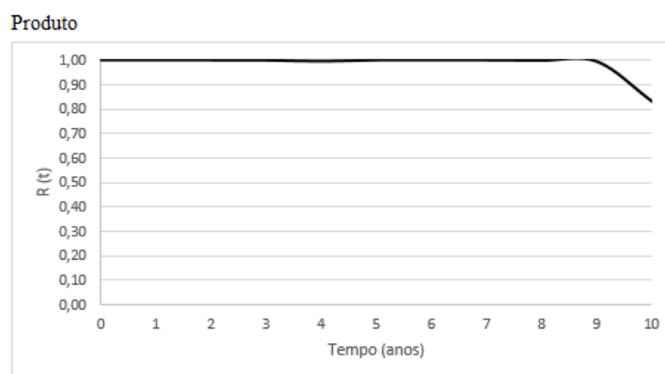


Figura 3.21: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização na quinta fase de projeto

Fonte: Autor

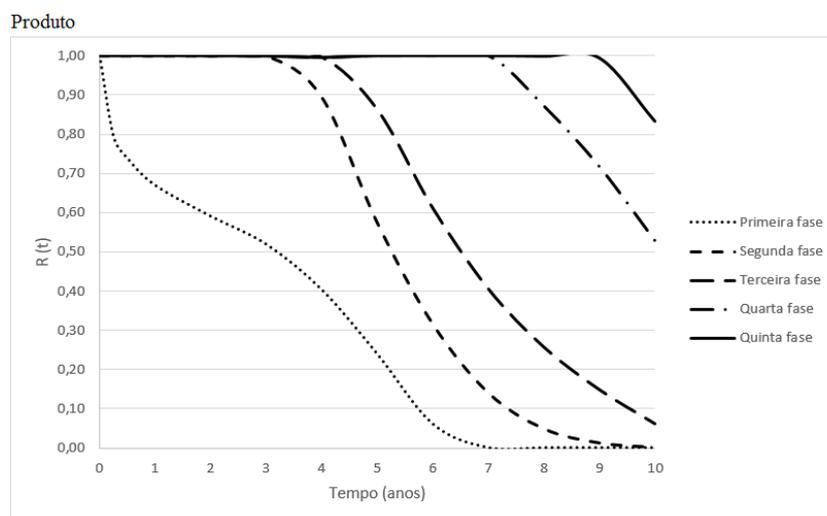


Figura 3.22: Curva da confiabilidade do produto *versus* o tempo de utilização para todas as fases do projeto

Fonte: Autor

Analisando as Figuras 3.21 e 3.22 pode-se perceber que houve um aumento significativo da confiabilidade do produto para todos os anos de utilização. Além disso, a confiabilidade para a quinta fase se manteve constante em 100% até o nono ano de utilização do produto.

A confiabilidade do sistema para cinco e dez anos de utilização atingiu a meta especificada de 90% e 80%, respectivamente, para o produto em estudo.

A Figura 3.23 apresenta o controle do crescimento da confiabilidade para todas as fases do projeto para os cinco anos de utilização do produto e a Figura 3.24 para dez anos de utilização.

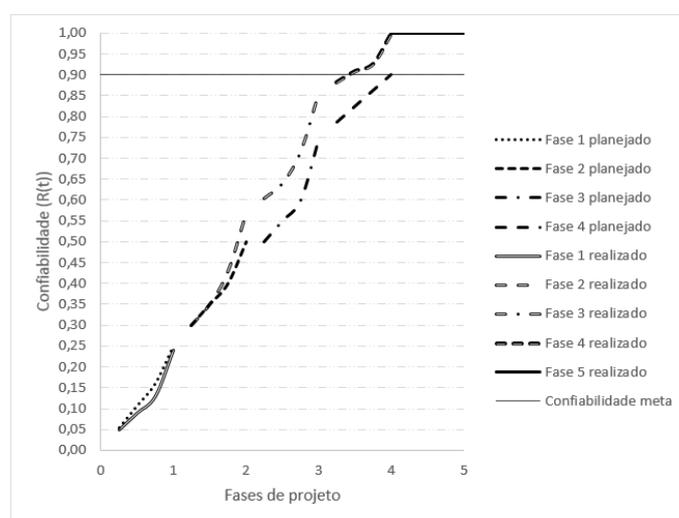


Figura 3.23: Curva de controle de crescimento da confiabilidade para cinco anos de uso para todas as fases do projeto

Fonte: Autor

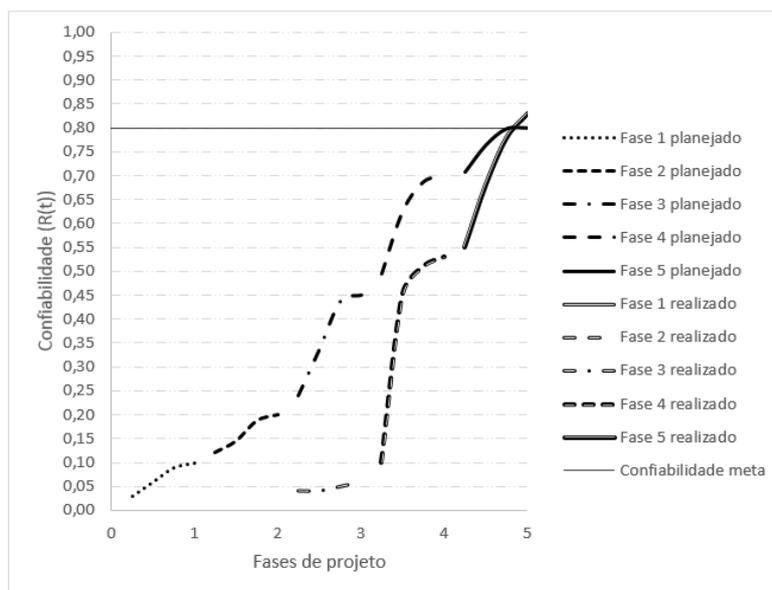


Figura 3.24: Curva de controle de crescimento da confiabilidade para dez anos de uso para todas as fases do projeto

Fonte: Autor

Analisando a Figura 3.23 pode-se perceber que a confiabilidade para cinco anos de uso na quarta fase de projeto superou o valor planejado no início do projeto. Isso se deve principalmente as ações realizadas e ao alto valor de confiabilidade meta para dez anos de uso do produto, pois como há a necessidade de atingir esse alto valor de confiabilidade (80%) para o dobro do tempo (dez anos) de uso do produto é provável que a confiabilidade do tempo inferior (cinco anos) atinja o valor máximo de 100%. Isso poderá não acontecer caso os dados de falha obtidos nos testes sejam valores que apresentem elevada variância ou elevado desvio padrão, o que não aconteceu para os dados desse estudo.

Analisando a Figura 3.24 percebe-se que o crescimento da confiabilidade para dez anos de uso foi inferior, até o final da quinta fase, ao planejado. No entanto, as fases quatro e cinco apresentaram alta taxa de crescimento, dessa maneira foi possível alcançar o valor meta de 80% de confiabilidade para dez anos de uso. Além disso, percebe-se que as modificações começaram a fazer efeito para o período de dez anos de utilização, apenas quando a confiabilidade para cinco anos já estava próxima à meta, isto é, ao fim da terceira fase do desenvolvimento.

As alterações realizadas em cada transição de fase de projeto são apresentadas de forma resumida na Tabela 3.16.

Transição de fase	Alterações realizadas
Fase 1 para Fase 2	Dureza do Alimentador alterada de 75 para 60 Shore "A", Área de colagem do Tanque de Armazenamento alterada de 5,00 para 6,00 mm, Espessura da Válvula alterada de 0,50 para 0,60 mm e Área de colagem do Transferidor alterada de 12,00 para 13,00 mm.
Fase 2 para Fase 3	Dureza do Alimentador alterada de 60 para 50 Shore "A", Dureza do Tanque de Armazenamento alterada de 20 para 15 Shore "A", Espessura da Válvula alterada de 0,60 para 0,70 mm, Dureza do Transferidor alterada de 80 para 60 Shore "A".
Fase 3 para Fase 4	Dureza do Tanque de Armazenamento alterada de 15 para 12 Shore "A", Dureza do Transferidor alterada de 60 para 55 Shore "A".
Fase 4 para Fase 5	Dureza do Transferidor alterada de 55 para 50 Shore "A".

Tabela 3.16: Resumo das alterações realizadas em cada fase de projeto

3.5. CONCLUSÃO

Este capítulo teve como tema o gerenciamento do crescimento da confiabilidade de um produto médico-hospitalar durante sua fase de desenvolvimento. O tema foi discutido no âmbito do desenvolvimento de um novo produto através de um estudo aplicado nas fases de escopo, planejamento do crescimento da confiabilidade, prototipagem, testes, avaliação da confiabilidade, realização de reprojeto e controle do crescimento da confiabilidade.

O objetivo principal deste capítulo foi gerenciar o crescimento da confiabilidade de forma sistemática a fim de alcançar a confiabilidade meta do produto para cinco e dez anos de utilização.

Para atingir o objetivo proposto, na etapa de planejamento do crescimento da confiabilidade apresentou-se uma metodologia que inicia-se com a construção da curva de planejamento, composta por metas intermediárias, ao fim de cada fase de projeto, baseadas na análise de projetos de desenvolvimento semelhantes realizados na empresa. Já para a etapa de avaliação e modelagem da confiabilidade atual apresentou-se uma metodologia baseada nos dados de falha, dos componentes em testes funcionais, os quais foram alimentados no Software Proconf para obtenção dos parâmetros de forma, escala, localização, curvas de confiabilidade e cálculo da confiabilidade dos componentes e do produto. Por fim, para a etapa de controle do crescimento da confiabilidade apresentou-

se uma metodologia para comparar o valor realizado com o valor planejado ao fim de cada fase de projeto e, assim, gerenciar recursos para alcance das metas.

Os resultados obtidos com a implementação dessas metodologias permitiram que os responsáveis pelo projeto planejassem o crescimento da confiabilidade ao longo das fases de projeto, identificassem os componentes críticos do produto, isto é, componentes que apresentam menores valores de confiabilidade e necessitam ser priorizados nas ações de melhorias. Além de realizar o reprojeto de componentes e controlar o crescimento da confiabilidade a fim de realocar recursos, tais como tempo, recursos humanos, investimentos, entre outros.

Quantitativamente, a confiabilidade do produto que era de 24,00% ao fim da primeira fase de projeto, aumentou para 100,00% ao fim da quarta fase, para cinco anos de utilização do produto e, portanto, ultrapassou o valor de confiabilidade meta de 90,00%. Além disso, a confiabilidade do produto para dez anos de uso aumentou de 0,00% da primeira fase de projeto para 83,00% na quinta fase de projeto, ultrapassando o valor meta de confiabilidade de 80,00%.

A implementação dessa metodologia contribuiu para o estabelecimento de um processo sistemático e adequado para o gerenciamento do crescimento da confiabilidade para ser utilizado no processo de desenvolvimento de novos produtos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desses procedimentos metodológicos em outros componentes e/ou produtos da empresa, a qual o estudo foi realizado, com o objetivo de elevar a confiabilidade de outros produtos e comprovar a eficiência da metodologia aplicada.

REFERÊNCIAS

AMSAA. **Military handbook–189C: Reliability Growth Management**. United States of America: Department of Defense, 2011. 141 p.

ARAVANIS, E. A. **Efeito do sistema de reticulação nas propriedades de compostos de borracha natural para peças de engenharia do setor automotivo**. 2006. 112f. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BHOWMICK, K. A; STEPHENS, L. H. **Handbook of elastomers**. New York: Marcel Dekker, 1988. 794 p.

COSGROVE, A; LOPEZ, L; ORTIZ, H. J; OSSWALD, T. **Modeling the Vulcanization Process of High Consistency Rubber and Liquid Silicone Rubber**. University of Wisconsin – Madison, Department of Mechanical Engineering, 2011.

CROWE, D. **Design for Reliability**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

DOW CORNING. Disponível em:

<http://www.dowcorning.de/de_DE/content/discover/discoverchem/blocks-nomenclature.aspx> Acesso em 16 dez. 2015.

GUIMARÃES, V. U. **Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KAMINSKI, R, T. Developing Effective Reliability Growth Strategies for DoD Programs. **IEEE Transactions**, 2013.

MANO, B, E. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 2000.

MARTINS, R. T. **Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

MORTON, M. **Rubber Technology**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. 638 p.

ROCHA, C. E; LOVISON, H. M. V; PIEROZAN, J. N. **Tecnologia de Transformação dos Elastômeros**. 2.ed. São Leopoldo: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI. 2003.

SCHAEDLER, I. L. **Gerenciamento do Crescimento da Confiabilidade: Um Estudo Aplicado no Setor de Máquinas Agrícolas**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003.

SIMPSON, R. B. **Rubber basics**. 1. ed. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2002. 213 p.

WASSERMAN, S. G. e SUDJIANTO, A. A comparison of three strategies for forecasting warranty claims. **IIE Transactions**, v.28, p. 967-977, 1996.

WHITE, J. R; De, S. K. **Rubber Technologist's Handbook**. 1. ed. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2001. 598 p.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta a conclusão da pesquisa realizada e as proposições para trabalhos futuros.

4.1. CONCLUSÃO

Essa dissertação teve como tema o gerenciamento da confiabilidade para o desenvolvimento de um produto médico-hospitalar. Tal gerenciamento foi aplicado em um produto médico-hospitalar nas fases de escopo de projeto, planejamento da confiabilidade, projeto de componentes, prototipagem, testes funcionais, avaliação da confiabilidade, planejamento do crescimento da confiabilidade, reprojeto de componentes e controle do crescimento da confiabilidade para alcance da confiabilidade planejada, a fim de garantir que os requisitos dos clientes, as regulações governamentais e as necessidades da empresa fossem atendidas.

O objetivo geral deste estudo foi promover o acréscimo da confiabilidade do produto para o alcance do valor de confiabilidade planejada. Os objetivos específicos foram: planejar a meta de confiabilidade para o produto, avaliar a confiabilidade atual (inicial) dos componentes e do produto, reprojeter os componentes do produto e por fim, alcançar a confiabilidade meta especificada para o produto.

Para atingir os objetivos propostos, na etapa de especificação da meta de confiabilidade apresentou-se uma metodologia composta por pesquisa de mercado, requisitos dos clientes, requisitos governamentais, *benchmarking*, engenharia reversa e alocação ótima de confiabilidade. Já para a etapa de avaliação da confiabilidade atual do produto, foi apresentada uma metodologia baseada nos dados de falha, dos componentes do produto, obtidos em testes funcionais. Esses dados foram alimentados no software PROCONF para obtenção dos parâmetros de forma, escala, localização, curvas de confiabilidade *versus* tempo de utilização do produto e cálculo da confiabilidade dos componentes e do produto. Além disso, para a etapa de reprojeto dos componentes e alcance da confiabilidade meta especificada para o produto, apresentou-se a metodologia de gerenciamento do crescimento da confiabilidade. Essa metodologia consiste, inicialmente, no planejamento do crescimento da confiabilidade para todas as fases do projeto, após avaliação e modelagem da confiabilidade para cada fase de projeto, seguida de reprojeto de componentes e testes funcionais e, por fim o controle do crescimento da

confiabilidade para comparar o valor realizado com o valor planejado ao fim de cada fase de projeto e, assim, gerenciar recursos para alcance das metas.

Os resultados obtidos com a implementação dessas metodologias permitiram que os responsáveis pelo projeto especificassem um valor meta de confiabilidade, identificassem os componentes críticos do produto, avaliassem a confiabilidade atual (inicial), identificando, assim, a lacuna existente entre essa confiabilidade e a planejada. Além disso, possibilitaram o planejamento do crescimento da confiabilidade ao longo das fases de projeto, o reprojetado de componentes e o controle do crescimento da confiabilidade para que fosse possível realocar recursos, tais como tempo, recursos humanos, investimentos, entre outros.

Quantitativamente, a confiabilidade do produto médico-hospitalar em estudo foi especificada em 90% e 80% para cinco e dez anos de utilização do produto, respectivamente. Além disso, de acordo com o método de alocação proporcional de confiabilidade foi especificado confiabilidades mínimas de 94,61%, 96,15%, 99,02%, 100% e 100% para os componentes Transferidor, Alimentador, Tanque, Válvula e Pressurizador, para cinco anos de utilização do produto, respectivamente. Para dez anos de uso foram especificadas confiabilidades de 88,96%, 91,90%, 97,96%, 100% e 100% para os componentes Transferidor, Alimentador, Tanque, Válvula e Pressurizador, respectivamente.

Através da aplicação do método de gerenciamento do crescimento da confiabilidade, foi possível aumentar de 24% para 100% a confiabilidade do produto para cinco anos de utilização e de 0,00% para 83% para dez anos. Esses resultados foram superiores aos valores planejados de confiabilidade meta.

A implementação dessa metodologia contribuiu para o estabelecimento de um processo sistemático e adequado para o alcance da confiabilidade meta de produtos em desenvolvimento.

4.2. PROPOSIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final desse trabalho, recomenda-se a continuidade de estudos complementares, os quais representam oportunidades de pesquisa e serão explicitados na sequência.

O primeiro ponto que necessita de aprofundamento é a aplicação dos procedimentos metodológicos apresentados, em diversos tipos de produtos, tais como: mecânicos, elétricos, químicos, entre outros e em outros segmentos, a fim de comprovar a generalidade e eficiência da metodologia proposta.

Outro ponto destaque é a aplicação desse método em produtos que apresentem forte interação entre seus componentes, isto é, que ao realizar-se uma modificação ou melhoria em um componente, o outro componente seja afetado de forma que possa haver alguma modificação nas suas propriedades de funcionamento e/ou resistência mecânica. Necessitando dessa forma, que seja realizado estudos mais estruturados de projeto, reprojeto e análise de modo e efeito de falha (FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*).

Um terceiro ponto importante é a realização de estudos que possibilitem uma acurácia maior na etapa de planejamento do crescimento da confiabilidade, isto é, que a curva de planejamento do crescimento seja construída e que o crescimento avaliado durante o controle seja igual ou próximo do planejado, para servir como referência para projetos futuros.

Além disso, estudos poderiam ser conduzidos para apontar o quanto os métodos apresentados de gerenciamento da confiabilidade, seguido de um produto confiável são capazes de aumentar a chance de sucesso comercial. Considerando como sucesso comercial o aumento da lucratividade da empresa, a satisfação dos clientes, o atendimento às normas regulamentares e o aumento da participação no mercado, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, K. K; GUHA, S. Reliability Allocation in a General System with Non-Identical Components – A practical approach. **Microeletron. Reliab.** v. 33, n. 8, p. 1089–1093, Haryana, India, 1992.
- ALVEN, W. H. **Reliability engineering prepared by ARINC research corporation.** Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; 1964.
- AMSAA. **Military handbook–189C: Reliability Growth Management.** United States of America: Department of Defense, 2011. 141 p.
- ANDER-EGG, E. **Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales.** 7. ed. Buenos Aires: Humanitas, 1978. 270 p.
- ARAVANIS, E. A. **Efeito do sistema de reticulação nas propriedades de compostos de borracha natural para peças de engenharia do setor automotivo.** 2006. 112f. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BHISE, D. V. **Designing Complex Products with System Engineering Processes and Techniques.** Boca Raton: CRC Press, 2014. 462 p.
- BHOWMICK, K. A; STEPHENS, L. H. **Handbook of elastomers.** New York: Marcel Dekker, 1988. 794 p.
- CHANG, Y; CHANG K; LIAW, C. Innovative Reliability Allocation Using the Maximal Entropy Ordered Weighted Averaging Method. **Computers and Industrial Engineering**, v. 57, p. 1274-1281, 2009.
- CHEN, Q; WEI, Y; QIN, J. Software Reliability Allocation with Safety Concerns in Medical Devices. **IEEE Transactions on Reliability**, 2012.
- COSGROVE, A; LOPEZ, L; ORTIZ, H. J; OSSWALD, T. **Modeling the Vulcanization Process of High Consistency Rubber and Liquid Silicone Rubber.** University of Wisconsin – Madison, Department of Mechanical Engineering, 2011.
- CROWE, D. **Design for Reliability.** Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- DOW CORNING. Disponível em:
<http://www.dowcorning.de/de_DE/content/discover/discoverchem/blocks-nomenclature.aspx> Acesso em 16 dez. 2015.
- FALCONE, D; SILVESTRI, A; BONA, D. **Integrated Factor Method (IFM): A New Reliability Allocation Technique.** In: Hamza MH, editor. SEA 2002: Proceeding of the IASTED International Conference on Software Engineering and Applications, Cambridge, USA, 2002. 166 p.
- FELICE, F. D; BONA, G. D; FALCONE, D; SILVESTRI, A. New Reliability Allocation Methodology: The Integrated Factors Method. **International Journal of Operations Quantitative Management**, v. 16, p. 67-85, 2001.
- FOGLIATTO, S. F. e RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2009.

- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.
- GUIMARÃES, V. U. **Modelagem para análise da confiabilidade de produtos em garantia**. 2002. 92 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- GUO, H; Jiang, M; Wang, W. A Method for Reliability Allocation with Confidence Level. **IEEE Transactions on Reliability**, Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2014.
- HAVIARAS, J. G. **Metodologia para análise de confiabilidade de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- KAMINSKI, R. T. Developing Effective Reliability Growth Strategies for DoD Programs. **IEEE Transactions**, 2013.
- KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook, vol 2**. Prentice Hall: Lancaster, Pennsylvania, 1991.
- KIM, O. K; YANG, Y; ZUO, J. M. A New Reliability Allocation weight for reducing the occurrence of severe failure effects. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 117, p. 81-88, 2013.
- LAKATOS, E. M. e MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 2003. 312 p.
- LEEMIS, L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: Prentice-Hall, 1995. 384 p.
- LLOYD, D; LIPOW, M. **Reliability: management, methods, and mathematics**. Milwaukee, Wisconsin – US: The American Society for Quality Control, 1984.
- MANO, B, E. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 2000.
- MARTINS, R. T. **Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento**. 2011. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) – Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- METTAS, A. Reliability Allocation and Optimization for Complex Systems. **IEEE Transactions on Reliability**, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.
- MORTON, M. **Rubber Technology**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. 638 p.
- RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Apostila do Curso de MBE em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

RIBEIRO, D. L. J. **Confiabilidade Industrial**. Notas de Aula. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 55 páginas, 2005.

ROCHA, C. E; LOVISON, H. M. V; PIEROZAN, J. N. **Tecnologia de Transformação dos Elastômeros**. 2.ed. São Leopoldo: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI. 2003.

SCHAEDLER, I. L. **Gerenciamento do Crescimento da Confiabilidade: Um Estudo Aplicado no Setor de Máquinas Agrícolas**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2003.

SIMPSON, R. B. **Rubber basics**. 1. ed. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2002. 213 p.

WANG, Y; YAM, M. C. R; ZUO. J. M; TSE. P. A Comprehensive Reliability Allocation Method for Design of CNC Lathes. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 72, p. 247-252, 2001.

WASSERMAN, S. G. e SUDJIANTO, A. A comparison of three strategies for forecasting warranty claims. **IIE Transactions**, v.28, p. 967-977, 1996.

WHITE, J. R; De, S. K. **Rubber Technologist's Handbook**. 1. ed. United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2001. 598 p.

YADAV, P. O; ZHUANG, X. A Practical Reliability Allocation Method Considering Modified Criticality Factors. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 129, p. 57-65, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Dados de falha dos componentes do produto.

APÊNDICE B: Curvas de confiabilidade dos componentes do produto.

APÊNDICE A: Dados de falha dos componentes do produto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	34	2,83	Vazamento
2	51	4,25	Vazamento
3	60	5,00	Vazamento
4	53	4,42	Vazamento
5	63	5,25	Vazamento
6	50	4,17	Vazamento
7	41	3,42	Vazamento
8	63	5,25	Vazamento
9	64	5,33	Vazamento
10	48	4,00	Vazamento
11	37	3,08	Vazamento
12	50	4,17	Vazamento
13	67	5,58	Vazamento
14	75	6,25	Vazamento
15	72	6,00	Vazamento
16	72	6,00	Vazamento
17	91	7,58	Vazou pressurizando o sistema
18	105	8,75	Vazou pressurizando o sistema
19	65	5,42	Vazamento
20	107	8,92	Vazou pressurizando o sistema
21	91	7,58	Vazou pressurizando o sistema
22	72	6,00	Vazamento
23	70	5,83	Vazamento
24	89	7,42	Vazamento
25	80	6,67	Vazou pressurizando o sistema

Tabela A1: Dados de falha do Alimentador na primeira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	8.570	23,48	Pistão descentrado
2	10.460	28,66	Vazamento
3	10.633	29,13	Vazamento
4	8.616	23,61	Vazamento
5	11.232	30,77	Vazamento
6	10.605	29,05	Vazamento
7	12.135	33,25	Vazamento
8	10.718	29,36	Vazamento
9	10.796	29,58	Vazamento
10	12.402	33,98	Vazamento

Tabela A2: Dados de falha do Pressurizador na primeira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	8.570	4,70	Pistão descentrado
2	10.460	5,73	Vazamento
3	10.633	5,83	Vazamento
4	8.616	4,72	Vazamento
5	11.232	6,15	Vazamento
6	10.605	5,81	Vazamento
7	12.135	6,65	Vazamento
8	10.718	5,87	Vazamento
9	10.796	5,92	Vazamento
10	12.402	6,80	Vazamento

Tabela A3: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na primeira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	12.287	6,73	Vazamento
2	13.938	7,64	Vazamento
3	14.753	8,08	Vazamento
4	15.415	8,45	Vazamento
5	15.793	8,65	Vazamento
6	16.313	8,94	Vazamento
7	18.471	10,12	Vazamento
8	19.439	10,65	Vazamento
9	19.958	10,94	Vazamento
10	20.662	11,32	Vazamento

Tabela A4: Dados de falha da Válvula na primeira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	618	0,11	Vazamento
2	1.135	0,21	Vazamento
3	0	0,00	Falha na montagem do componente
4	38.200	6,98	Vazamento
5	121.200	22,14	Vazamento
6	150.907	27,56	Teste parado, componente recolhido
7	16.429	3,00	Vazamento
8	6.791	1,24	Vazamento
9	3.370	0,62	Vazamento
10	150.066	27,41	Teste parado, componente recolhido

Tabela A5: Dados de falha do Transferidor na primeira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	89	7,42	Vazou pressurizando o sistema
2	110	9,17	Vazamento
3	130	10,83	Vazamento
4	84	7,00	Vazou pressurizando o sistema
5	97	8,08	Vazou pressurizando o sistema
6	125	10,42	Vazamento
7	83	6,92	Vazou pressurizando o sistema
8	101	8,42	Vazou pressurizando o sistema
9	128	10,67	Vazamento
10	109	9,08	Vazamento
11	87	7,25	Vazou pressurizando o sistema
12	88	7,33	Vazou pressurizando o sistema
13	114	9,50	Vazamento
14	63	5,25	Vazou pressurizando o sistema
15	98	8,17	Vazou pressurizando o sistema
16	76	6,33	Vazou pressurizando o sistema
17	123	10,25	Vazamento
18	119	9,92	Vazamento
19	106	8,83	Vazou pressurizando o sistema
20	120	10,00	Vazamento
21	85	7,08	Vazou pressurizando o sistema
22	62	5,17	Vazou pressurizando o sistema
23	86	7,17	Vazou pressurizando o sistema
24	70	5,83	Vazou pressurizando o sistema
25	89	7,42	Vazou pressurizando o sistema

Tabela A6: Dados de falha do Alimentador na segunda fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	10.311	5,65	Vazamento
2	8.572	4,70	Vazamento
3	11.898	6,52	Vazamento
4	15.511	8,50	Vazamento
5	13.787	7,55	Vazamento
6	18.463	10,12	Vazamento
7	18.712	10,25	Vazamento
8	19.387	10,62	Vazamento
9	18.032	9,88	Vazamento
10	19.808	10,85	Vazamento

Tabela A7: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na segunda fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	23.850	13,07	Vazamento
2	17.024	9,33	Vazamento
3	18.484	10,13	Vazamento
4	20.454	11,21	Vazamento
5	19.865	10,88	Vazamento
6	23.981	13,14	Vazamento
7	24.541	13,45	Vazamento
8	24.922	13,66	Vazamento
9	22.255	12,19	Vazamento
10	17.381	9,52	Vazamento

Tabela A8: Dados de falha da Válvula na segunda fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	21.355	3,90	Vazamento
2	26.917	4,92	Vazamento
3	26.184	4,78	Vazamento
4	22.146	4,04	Vazamento
5	26.614	4,86	Vazamento
6	25.018	4,57	Vazamento
7	24.757	4,52	Vazamento
8	27.362	5,00	Vazamento
9	26.216	4,79	Vazamento
10	23.463	4,29	Vazamento
11	26.044	4,76	Vazamento
12	28.909	5,28	Vazamento
13	32.089	5,86	Vazamento
14	35.618	6,51	Vazamento
15	39.537	7,22	Vazamento
16	43.886	8,02	Vazamento
17	48.713	8,90	Vazamento
18	54.071	9,88	Vazamento
19	60.019	10,96	Vazamento
20	66.621	12,17	Vazamento

Tabela A9: Dados de falha do Transferidor na segunda fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	158	13,17	Vazamento
2	172	14,33	Vazamento
3	179	14,92	Vazamento
4	117	9,75	Vazou pressurizando o sistema
5	159	13,25	Vazamento
6	131	10,92	Vazamento
7	112	9,33	Vazou pressurizando o sistema
8	117	9,75	Vazou pressurizando o sistema
9	136	11,33	Vazamento
10	153	12,75	Vazamento
11	164	13,67	Vazamento
12	149	12,42	Vazamento
13	136	11,33	Vazamento
14	136	11,33	Vazamento
15	172	14,33	Vazamento
16	159	13,25	Vazamento
17	127	10,58	Vazamento
18	165	13,75	Vazamento
19	180	15,00	Vazamento
20	169	14,08	Vazamento
21	141	11,75	Vazamento
22	149	12,42	Vazamento
23	161	13,42	Vazamento
24	175	14,58	Vazamento
25	113	9,42	Vazou pressurizando o sistema

Tabela A10: Dados de falha do Alimentador na terceira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	18.955	10,39	Vazamento
2	17.635	9,66	Vazamento
3	20.184	11,06	Vazamento
4	20.124	11,03	Vazamento
5	18.429	10,10	Vazamento
6	16.511	9,05	Vazamento
7	20.108	11,02	Vazamento
8	21.974	12,04	Vazamento
9	18.317	10,04	Vazamento
10	20.164	11,05	Vazamento

Tabela A11: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na terceira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	23.821	13,05	Vazamento
2	23.109	12,66	Vazamento
3	21.490	11,78	Vazamento
4	23.456	12,85	Vazamento
5	20.103	11,02	Vazamento
6	22.699	12,44	Vazamento
7	21.893	12,00	Vazamento
8	22.087	12,10	Vazamento
9	23.236	12,73	Vazamento
10	20.070	11,00	Vazamento

Tabela A12: Dados de falha da Válvula na terceira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	27.230	4,97	Vazamento
2	25.364	4,63	Vazamento
3	32.750	5,98	Vazamento
4	28.522	5,21	Vazamento
5	26.802	4,90	Vazamento
6	33.195	6,06	Vazamento
7	30.769	5,62	Vazamento
8	33.842	6,18	Vazamento
9	32.190	5,88	Vazamento
10	30.827	5,63	Vazamento
11	33.139	6,05	Vazamento
12	35.624	6,51	Vazamento
13	38.296	6,99	Vazamento
14	41.169	7,52	Vazamento
15	44.256	8,08	Vazamento
16	47.575	8,69	Vazamento
17	51.144	9,34	Vazamento
18	54.979	10,04	Vazamento
19	59.103	10,80	Vazamento
20	63.535	11,60	Vazamento

Tabela A13: Dados de falha do Transferidor na terceira fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	18.397	10,08	Vazamento
2	18.461	10,12	Vazamento
3	18.600	10,19	Vazamento
4	19.160	10,50	Vazamento
5	19.235	10,54	Vazamento
6	19.246	10,55	Vazamento
7	19.980	10,95	Vazamento
8	20.433	11,20	Vazamento
9	20.551	11,26	Vazamento
10	21.852	11,97	Vazamento

Tabela A14: Dados de falha do Tanque de Armazenamento na quarta fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	44.170	8,07	Vazamento
2	44.710	8,17	Vazamento
3	49.889	9,11	Vazamento
4	45.660	8,34	Vazamento
5	51.294	9,37	Vazamento
6	41.012	7,49	Vazamento
7	51.505	9,41	Vazamento
8	54.037	9,87	Vazamento
9	46.269	8,45	Vazamento
10	52.842	9,65	Vazamento
11	56.805	10,38	Vazamento
12	61.066	11,15	Vazamento
13	65.645	11,99	Vazamento
14	70.569	12,89	Vazamento
15	75.862	13,86	Vazamento
16	81.551	14,90	Vazamento
17	87.667	16,01	Vazamento
18	94.243	17,21	Vazamento
19	101.311	18,50	Vazamento
20	108.909	19,89	Vazamento

Tabela A15: Dados de falha do Transferidor na quarta fase do projeto

CORPO DE PROVA	CICLOS	EQUIVALÊNCIA EM ANOS	OBSERVAÇÃO
1	52.858	9,65	Vazamento
2	57.666	10,53	Vazamento
3	58.550	10,69	Vazamento
4	58.648	10,71	Vazamento
5	59.111	10,80	Vazamento
6	59.425	10,85	Vazamento
7	54.589	9,97	Vazamento
8	59.622	10,89	Vazamento
9	56.331	10,29	Vazamento
10	55.285	10,10	Vazamento
11	55.838	10,20	Vazamento
12	56.396	10,30	Vazamento
13	56.960	10,40	Vazamento
14	57.530	10,51	Vazamento
15	58.105	10,61	Vazamento
16	58.686	10,72	Vazamento
17	59.273	10,83	Vazamento
18	59.866	10,93	Vazamento
19	60.464	11,04	Vazamento
20	61.069	11,15	Vazamento

Tabela A16: Dados de falha do Transferidor na quinta fase do projeto

APÊNDICE B: Curvas de confiabilidade dos componentes do produto

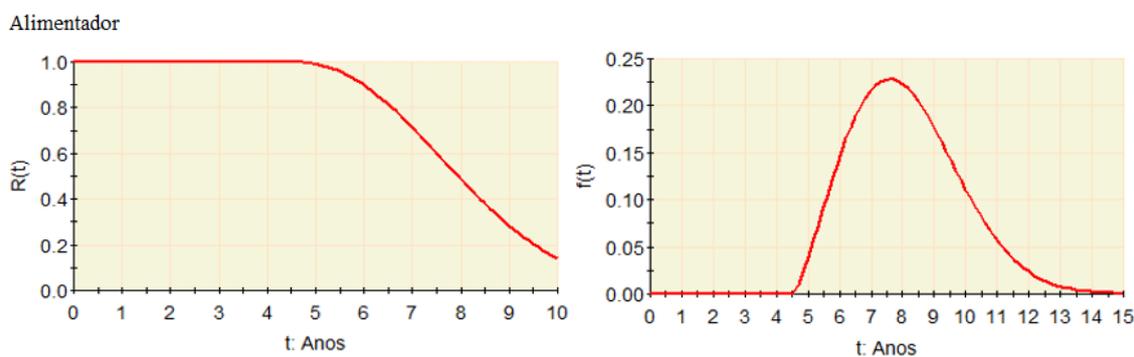


Figura A1: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Alimentador na segunda fase de projeto

Fonte: Autor

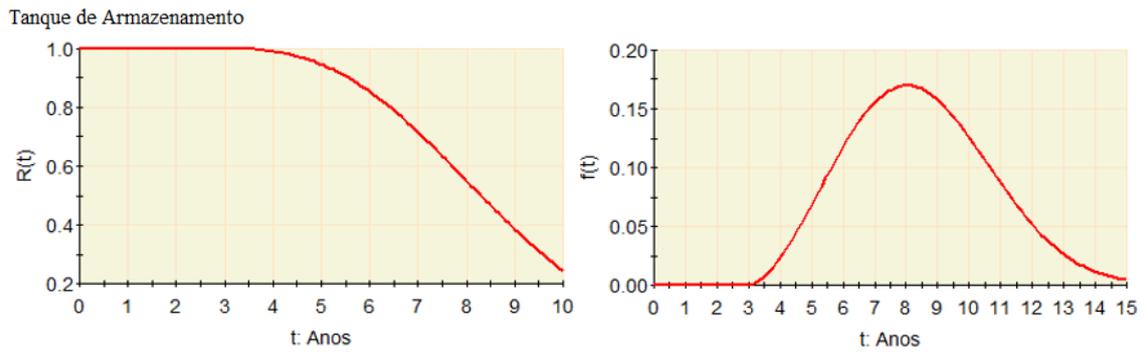


Figura A2: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na segunda fase de projeto

Fonte: Autor

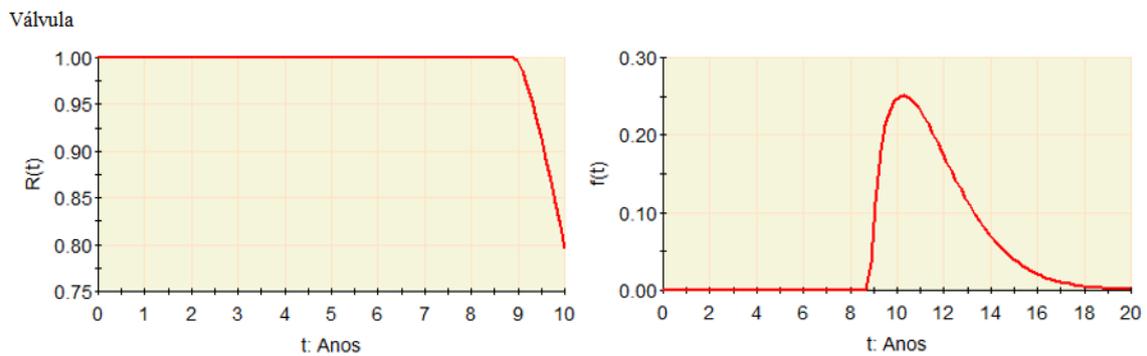


Figura A3: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para a Válvula na segunda fase de projeto

Fonte: Autor

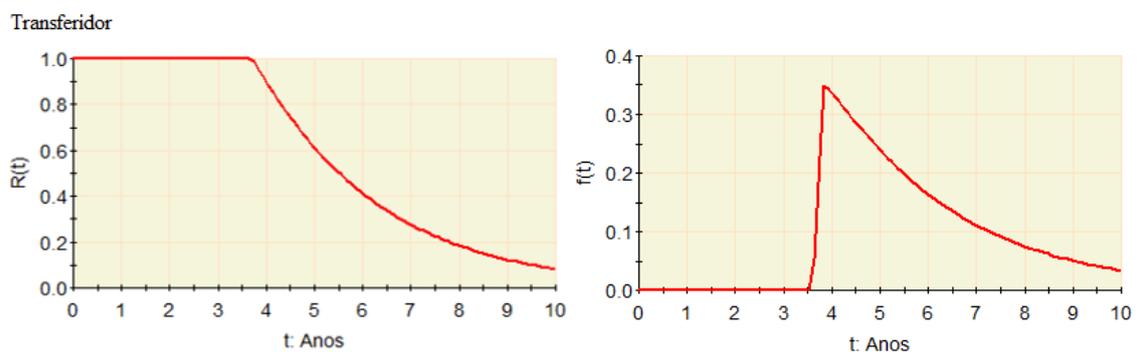


Figura A4: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Transferidor na segunda fase de projeto

Fonte: Autor

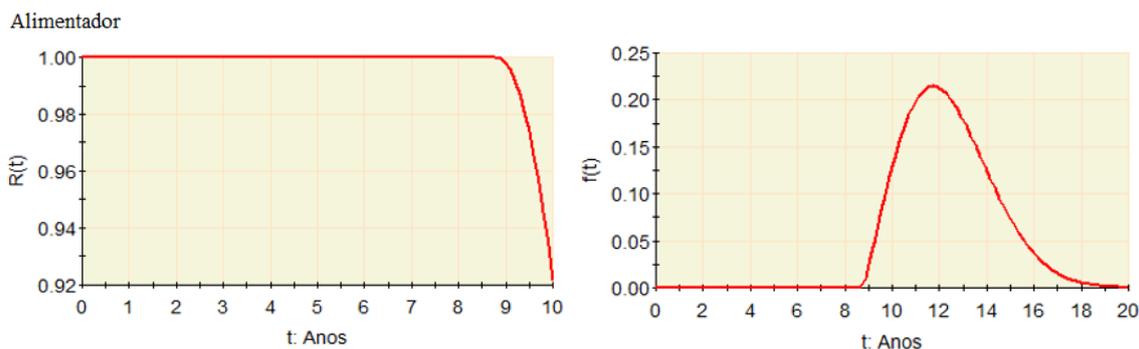


Figura A5: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Alimentador na terceira fase de projeto

Fonte: Autor

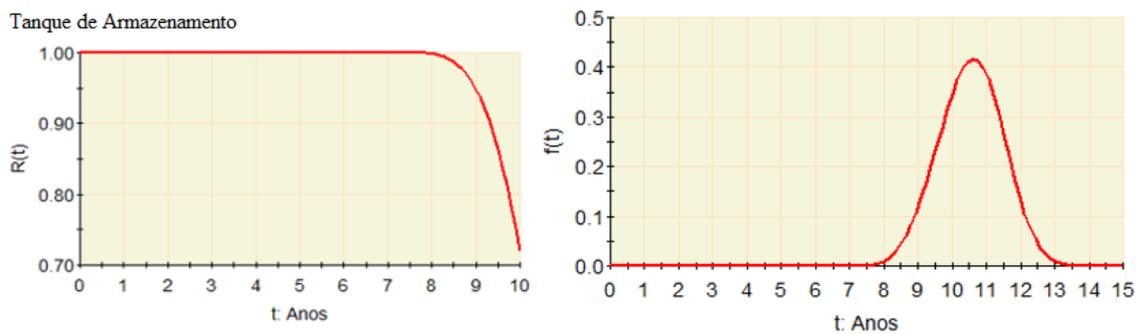


Figura A6: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na terceira fase de projeto

Fonte: Autor

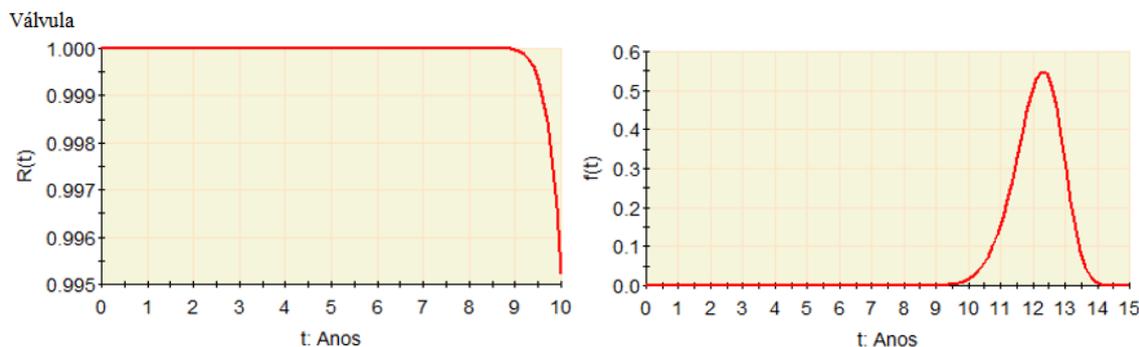


Figura A7: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para a Válvula na terceira fase de projeto

Fonte: Autor

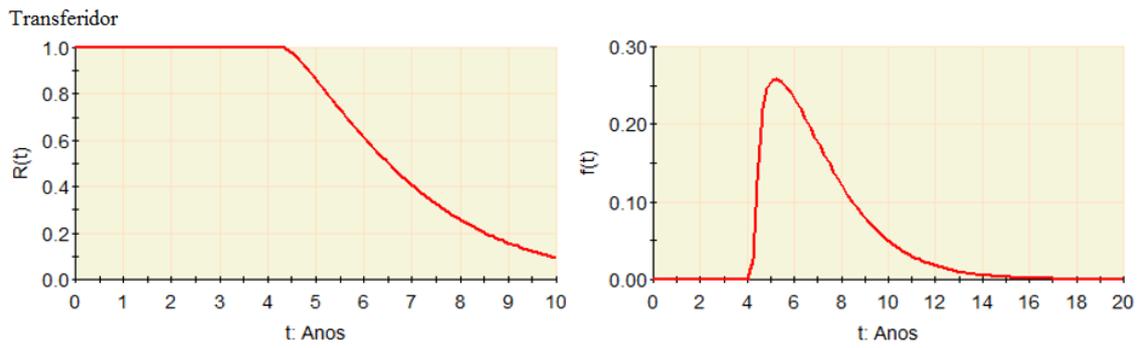


Figura A8: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Transferidor na terceira fase de projeto

Fonte: Autor

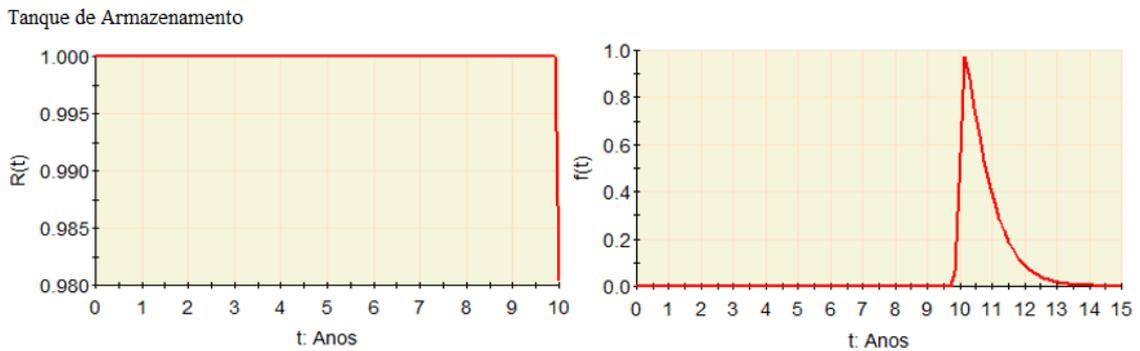


Figura A9: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Tanque de Armazenamento na quarta fase de projeto

Fonte: Autor

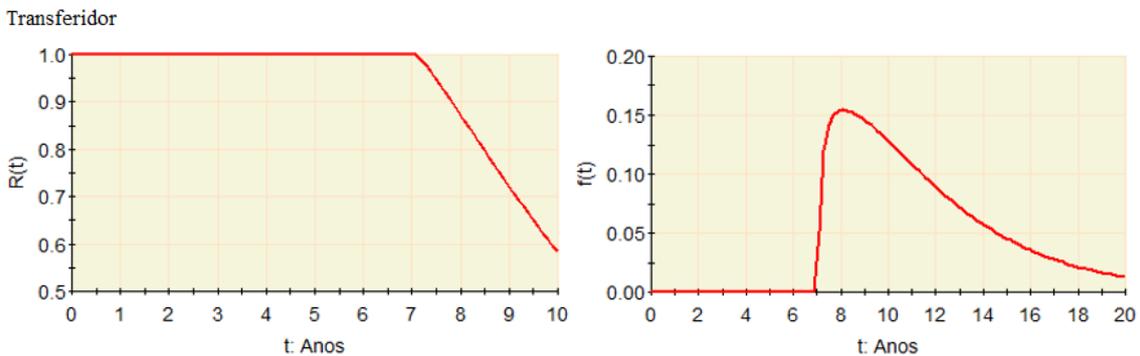


Figura A10: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Transferidor na quarta fase de projeto

Fonte: Autor

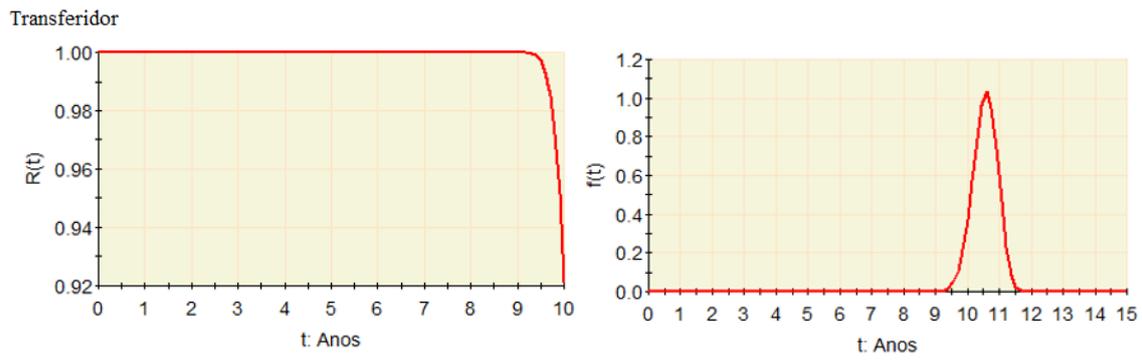


Figura A11: Curvas da confiabilidade e densidade de probabilidade *versus* o tempo de utilização do produto para o Transferidor na quinta fase de projeto

Fonte: Autor