

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



**RENNAN DE MELO NOGUEIRA**

**METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE VIDA ACELERADA  
DOS MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA  
ELÉTRICA EM INSTALAÇÕES DE BAIXA TENSÃO DO  
ESPÍRITO SANTO**

VITÓRIA – ES  
OUTUBRO/2016

RENNAN DE MELO NOGUEIRA

**METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE VIDA ACELERADA  
DOS MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA  
ELÉTRICA EM INSTALAÇÕES DE BAIXA TENSÃO DO  
ESPÍRITO SANTO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Rennan de Melo Nogueira**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof. José Luiz Borba

Coorientador: Eng. Bruno Gonçalves de Souza

VITÓRIA – ES  
OUTUBRO/2016

RENNAN DE MELO NOGUEIRA

**METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE VIDA ACELERADA  
DOS MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM INSTALAÇÕES DE BAIXA TENSÃO DO ESPÍRITO  
SANTO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Rennan de Melo Nogueira**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 31 de Outubro de 2016.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



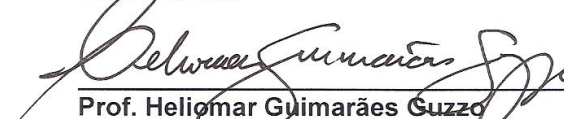
---

**Prof. José Luiz Borba**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



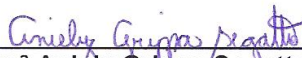
---

**Eng. Bruno Gonçalves de Souza**  
EDP Escelsa  
Coorientador



---

**Prof. Heliomar Guimarães Guzzo**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador



---

**Eng.ª Anieli Grippa Segatto**  
EDP Escelsa  
Examinadora

*À Deus.  
À minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela luz e sabedoria que me acompanham diariamente e me guiaram durante todo o curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço aos meus pais, Pedro Celestino Nogueira e Maria do Carmo de Melo Nogueira, por todo o amor que me proporcionaram. Obrigado por me apoiarem em todas as minhas decisões.

Ao Prof. José Luiz Borba pelos ensinamentos e conversas que auxiliaram não só nesse trabalho, mas também em minha formação como profissional.

Ao Engenheiro Bruno Gonçalves de Souza, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e por toda confiança depositada em mim desde o início de minhas atividades na EDP Escelsa.

À Engenheira Aniely Grippa Segatto, por todo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Engenheiro José Flávio Ramos e aos colegas de curso, pelos ensinamentos acerca de confiabilidade.

Aos colegas de trabalho, que sempre se mostraram dispostos a contribuir com minha formação.

À EDP Escelsa, por proporcionar os recursos necessários para a realização do trabalho.

Ao meu irmão, Rodrigo de Melo Nogueira por compreender os meus esforços.

A todos meus amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização de mais esse sonho.

## RESUMO

A medição de energia elétrica em consumidores de baixa de tensão no Brasil, que era realizada exclusivamente através de medidores eletromecânicos, passa por um processo de migração para a tecnologia eletrônica, iniciada na década passada. Durante essa transição, evidentemente, ocorreram problemas. O mais latente deles está relacionado à durabilidade dos medidores e, em virtude dos mesmos medidores serem parte do ativo financeiro das concessionárias de energia, essa questão se estende da parte técnica à financeira. Com isso, o estudo da confiabilidade operacional dos medidores eletrônicos de energia se tornou fundamental para as distribuidoras de energia elétrica e para adequação à essa nova realidade, os ensaios de vida acelerada tornam-se fundamentais. Esses ensaios antecipam o tempo das falhas dos medidores por meio de estímulos de estresse do produto, viabilizando a projeção da durabilidade desses equipamentos. Assim, este trabalho tem por finalidade definir a metodologia para a realização de ensaios de vida acelerada para os medidores de energia elétrica da EDP Escelsa, com base na norma ABNT NBR 16078:2012. A realização desses ensaios sob as condições estabelecidas será fundamental para identificar, com elevado nível de segurança, se determinados lotes de medidores durarão no mínimo 13 anos, quando instalados no estado do Espírito Santo, conforme o prazo regulatório de amortização desse tipo de equipamento para as empresas distribuidoras de energia elétrica. Ademais, um documento produzido com os resultados e a análise dos resultados dos ensaios, servirão como embasamento para a realização de possíveis ações mitigatórias aos fabricantes, conforme estabelecido nos novos contratos de compra da empresa.

Palavras Chaves: Confiabilidade, Taxa de Falha, Medidor Eletrônico de Energia Elétrica, Ensaio de Vida Acelerada, Estresse-Vida.

## **ABSTRACT**

The measurement of electrical power in low-voltage consumers in Brazil that have been held exclusively by electromechanical meters, goes through a process of migration to electronic technology, which began in the past decade. During this transition, of course, problems occurred. The most latent one is related to the durability of meters and, by virtue of the meters are part of the financial assets of the power distribution companies, this problem extends from the technical part financial. Thus, the study of the operational reliability of electronic energy meters has become critical to the electricity distributors and to adapt to this new reality, the accelerated life testing become crucial. These tests anticipate the time of failure of meters through the product stress stimuli, enabling the projection of the durability of this equipment. This paper aims to define the methodology for conducting accelerated life testing for electrical energy meters of EDP Escelsa, based on Brazilian standard ABNT NBR 16078:2012. The realization of these tests under the established conditions will be fundamental to identify, with a high level of security if certain lots will last meters at least 13 years when installed in the state of Espírito Santo, as the regulatory amortization period of this type of equipment for electricity distribution companies. Moreover, a document produced with the results and analysis of the test results will serve as basis for the realization of possible actions mitigating the manufacturer, as set out in the new purchase contracts of the company.

Key words: Reliability, Failure Rate, Electronic Meter of Electric Power, Accelerated Life Testing, Stress-Life

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor de energia elétrica químico desenvolvido por Thomas Edison..	14
Figura 2 - O medidor eletromecânico desenvolvido por Shallenberger .....	15
Figura 3 - Anúncios publicitários com foco em confiabilidade .....	17
Figura 4 - Medidor eletrônico monofásico.....	18
Figura 5 - Exemplo de pdf .....	32
Figura 6 - Exemplo de cdf.....	33
Figura 7 - Exemplo de função de confiabilidade .....	34
Figura 8 - Influência do parâmetro $\sigma$ na pdf da distribuição normal.....	43
Figura 9 - Influência do parâmetro $\mu$ na pdf da distribuição normal .....	44
Figura 10 - Influência do parâmetro $\sigma'$ na pdf da distribuição lognormal .....	45
Figura 11 - Influência do parâmetro $\mu'$ na pdf da distribuição lognormal .....	46
Figura 12 - Influência do parâmetro $\lambda$ na pdf da distribuição exponencial .....	47
Figura 13 - Influência do parâmetro $\gamma$ na pdf da distribuição exponencial .....	48
Figura 14 - Influência do parâmetro $\beta$ na pdf da distribuição Weibull .....	50
Figura 15 - Influência do parâmetro $\beta$ na taxa de falha da distribuição Weibull.....	51
Figura 16 - Influência do parâmetro $\eta$ na pdf da distribuição Weibull .....	52
Figura 17 - Influência do parâmetro $\gamma$ na pdf da distribuição Weibull .....	53
Figura 18 - Comparação entre as pdf's das distribuições normal e Weibull .....	54
Figura 19 - Diagrama dos limites de operação de equipamentos.....	56
Figura 20 - Representação da pdf para uso normal e para ensaio acelerado .....	59
Figura 21 - Histórico de umidade e temperaturas máximas e mínimas .....	69
Figura 22 - Planilhas de cálculo das condições de uso normal .....	71



## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Histórico de Preço de Compra do Medidor Monofásico .....	19
Gráfico 2 - Depreciação Percentual Regulatória dos Medidores .....	20
Gráfico 3 - Representação da Curva da Banheira .....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CDF	Cumulative Density Function
Copel	Companhia Paranaense de Energia
Celpe	Companhia Energética de Pernambuco
EDP	Energia de Portugal
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
kW	KiloWatt
Labelec	Laboratório de Estudos, Desenvolvimentos e Actividades Laboratoriais
MT	Media Tensão
MTTF	Mean Time to Failure
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PDF	Probability Density Function
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 Apresentação e Objeto de Pesquisa.....	12
1.1.1 Histórico da Medição e do Uso Comercial da Energia Elétrica.....	13
1.1.2 A Engenharia de Confiabilidade .....	16
1.1.2.1 A Engenharia da Confiabilidade Aplicada aos Medidores de Energia Elétrica.....	17
1.2 Justificativa .....	19
1.3 Objetivos Gerais e Objetivos Específicos .....	21
1.3.1 Objetivos Gerais .....	21
1.3.2 Objetivos Específicos .....	22
1.4 Alocação de Recursos .....	22
1.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas.....	23
1.6 Estrutura do Trabalho .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1 Normas Aplicáveis .....	25
2.1.1 ABNT NBR 5313:1997.....	25
2.1.2 ABNT NBR 14521:2011.....	26
2.1.3 ABNT NBR 16078:2012.....	29
2.2 Engenharia de Confiabilidade.....	30
2.2.1 Definições de Confiabilidade .....	30
2.2.2 Conceitos Estatísticos e de Engenharia de Confiabilidade.....	31
2.2.2.1 PDF - Probability Density Function .....	31
2.2.2.2 CDF - Cumulative Density Function.....	32
2.2.2.3 As funções confiabilidade e não-confiabilidade .....	33
2.2.2.4 Função confiabilidade condicional .....	35
2.2.2.5 Taxa de falha .....	35
2.2.2.6 MTTF – Mean Time to Failure.....	37
2.2.2.7 Vida mediana .....	37
2.2.2.8 Vida modal .....	37
2.2.3 Ferramenta Computacional .....	38
2.2.4 Métodos Estatísticos.....	39

<b>3</b>	<b>MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE VIDA.....</b>	<b>40</b>
3.1	Parâmetros Comuns às Distribuições .....	41
3.2	Distribuições de Vida .....	42
3.2.1	Distribuição Normal .....	42
3.2.2	Distribuição Lognormal .....	44
3.2.3	Distribuição Exponencial .....	46
3.2.4	Distribuição de Weibull .....	48
<b>4</b>	<b>MODELO DE ESTRESSE-VIDA E ENSAIOS DE VIDA ACELERADA .....</b>	<b>55</b>
4.1	Ensaio de Estresse-Vida .....	56
4.1.1	Testes de Vida Acelerada Qualitativos .....	56
4.1.2	Testes de Vida Acelerados Quantitativos .....	57
4.1.2.1	Ensaio de Aceleração de Uso Contínuo.....	58
4.1.2.2	Ensaio de Vida Acelerada.....	58
4.2	Modelos de Estresse-Vida .....	60
4.2.1	Modelo de Aceleração de Temperatura Arrhenius .....	60
4.2.2	Modelo de Aceleração de Temperatura e Umidade de Peck .....	61
4.3	Metodologia para Ensaio de Vida Acelerada .....	63
4.3.1	Definição da Amostra .....	63
4.3.2	Definição das Características de Vida do Medidor .....	64
4.3.3	Definição do Método de Ensaio para Detectar Falhas.....	65
4.3.4	Definição dos Parâmetros <i>Ea</i> e <i>n</i> .....	66
4.3.5	Definição das Condições Normais de Uso .....	68
4.3.5.1	Condição de temperatura.....	69
4.3.5.2	Condição de umidade .....	70
4.3.5.3	Definição dos parâmetros para os medidores da EDP Escelsa .....	70
4.3.6	Definição dos Ensaio e dos Níveis de Estresse.....	72
4.3.6.1	Procedimento para o término dos ensaios.....	72
4.3.6.2	Procedimento para coletar dados de tempo até falhar .....	74
4.3.7	Análise dos Dados de Laboratório.....	75
4.3.8	Apresentação dos Resultados .....	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação e Objeto de Pesquisa

A medição de energia elétrica em consumidores de baixa de tensão em nosso país que, desde seus primórdios, era realizada através de medidores eletromecânicos, passa por um processo de migração para a tecnologia eletrônica, iniciada na década passada. No cenário capixaba, esse processo iniciado em março de 2008, já está presente em cerca de 40% das unidades consumidoras de baixa tensão do estado (1).

As principais motivações para essa migração têm razões econômicas, já que o preço de custo do modelo eletrônico atingiu níveis mais atraentes do que o seu antecessor (2). Não obstante, somam-se a esse fato elementos como: a maior precisão na medição e a circunstância dessa tecnologia ser menos vulnerável a irregularidades por intervenção de terceiros, que sem dúvidas contribuíram na decisão de substituição.

Quanto a funcionalidade, essa não se alterou para a maioria das unidades consumidoras atendidas em baixa tensão, tendo mudança significativa apenas em projetos específicos de medição e combate às perdas, aplicáveis aos clientes AT e MT e aos clientes BT com carga declarada maior do que 50 kW. Nesses clientes, são adotados medidores de energia eletrônicos mais complexos, com funcionalidades adicionais como por exemplo: medição de energia ativa e reativa, comunicação remota, medição bidirecional, etc.

Diante desse cenário de mudança, surgem problemas inerentes ao fim da produção em larga escala dos medidores eletromecânicos, na qual já se tinha o estado da arte atingido, para a inserção no mercado de uma nova tecnologia, ainda em fase de consolidação e maturação.

Além disso, tem-se como fator agravante desse cenário, o fato de que a implementação massiva se deu sem a existência de experiências de campo relacionadas a medição eletrônica sob as condições climáticas semelhantes às do Brasil (3), nas quais, quando se trata do cliente convencional atendido em BT, o equipamento frequentemente opera exposto a altas temperaturas e à alta umidade.

Ademais, os critérios técnicos utilizados na avaliação do produto – os testes exigidos pelo instituto metrológico brasileiro (Inmetro) não foram suficientes para

garantir um desempenho aceitável no campo (4), em relação a sua vida útil. Essa insuficiência, deve-se a inexistência de ensaios de vida acelerada de homologação, sem os quais torna-se impossível a garantia da vida útil do equipamento dentro do prazo de amortização regulatório estipulado pela ANEEL.

Portanto, diante dessa carência e com a constatação de um elevado índice de falhas em medidores eletrônicos, em que se estima operarem durante a metade do prazo regulatório requerido de 13 anos, os estudos acerca da confiabilidade dos medidores eletrônicos se tornam cruciais para a o setor de distribuição de energia elétrica no Brasil.

### **1.1.1 Histórico da Medição e do Uso Comercial da Energia Elétrica**

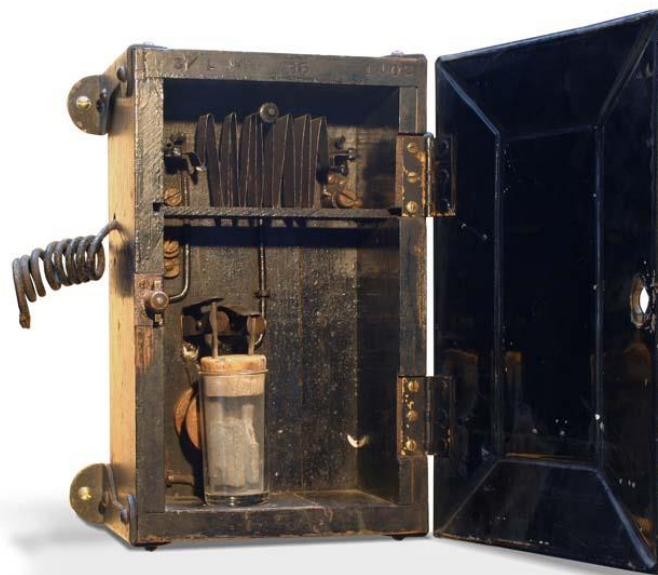
O início do uso comercial da energia elétrica nos remete a invenção da primeira lâmpada incandescente comercializável em 1879, por Thomas A. Edison. Um ano depois, o inventor e empresário americano fundou a companhia que levava o seu nome, a *Edison Electric Illuminating Company of New York*, que foi responsável pela criação da primeira planta de geração e distribuição elétrica do mundo, em 1882.

A planta da cidade de Nova Iorque era em corrente contínua e a cobrança da energia fornecida era realizada, inicialmente, pela quantidade de lâmpadas que o cliente possuía conectado ao sistema (5).

Na tentativa de melhorar o sistema de cobrança, Edison desenvolveu um medidor de energia elétrica químico, que consistia em um jarro com placas de zinco imersas em uma solução da mesma substância (6). O medidor era instalado em série, na entrada da unidade consumidora, e à medida que a corrente fluía pelo jarro, uma das placas era corroída e essa massa era depositada na outra placa.

Mensalmente, as placas eram levadas ao laboratório de medição na estação central de energia de Nova York e pesadas. Com isso, a cobrança era realizada pela diferença de massa entre as placas (7). A Figura 1 apresenta o medidor desenvolvido por Edison.

Figura 1 - Medidor de energia elétrica químico desenvolvido por Thomas Edison



Fonte: Site do Spark Museum (8)

O sistema de corrente contínua, porém, tinha suas limitações. A pior delas, sem dúvidas, era a incapacidade de meios para modificar os níveis de tensão e com isso, a geração só era viável quando realizada próximo aos consumidores.

Diante dessa deficiência, o empresário e engenheiro americano George Westinghouse comprou as patentes de um gerador de energia alternada e de um transformador de potência desenvolvidos por Nikola Tesla e deu início à comercialização de energia elétrica na forma de corrente alternada, que logo se mostrou mais rentável (9).

A comercialização foi gerida pela empresa que também levava o nome de seu criador, a *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, criada em 1886. Logo após a criação da companhia, estudos e testes foram realizados no intuito de que um método definitivo e confiável fosse desenvolvido para a medição em corrente alternada.

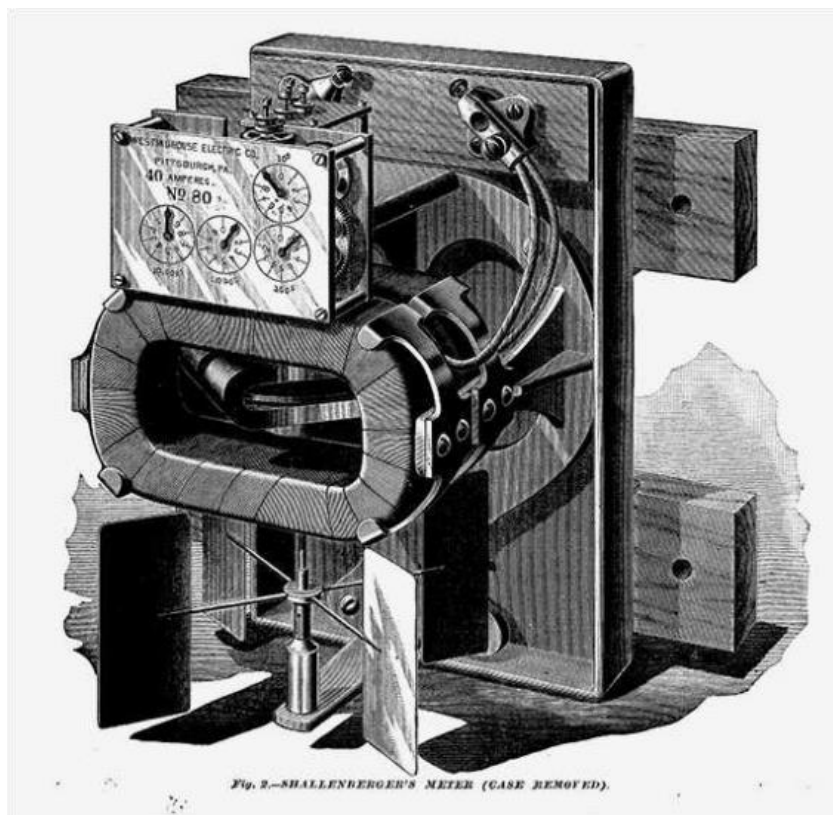
Menos de dois anos depois, em abril de 1888, o engenheiro e eletricitista chefe da empresa Oliver Blackburn Shallenberger patenteia um medidor de energia para corrente alternada, que passou a ser adotado como padrão na indústria (5).

O medidor de Shallenberger é um medidor de ampere-hora: o inventor foi responsável por desenvolver uma estratégia de tornar o fluxo do circuito de corrente

do medidor em quadratura com a tensão, possibilitando a medição de energia em corrente alternada (6). Isso é, um mecanismo primitivo de um motor de indução de polos sombreados.

Contudo, apesar de ter sido concebido para o funcionamento com correntes alternadas, o medidor funcionava muito bem também para correntes contínuas e se tornou um sucesso comercial imediato. Na figura a seguir, vemos o modelo proposto por Shallenberger, que é baseado no princípio da indução.

Figura 2 - O medidor eletromecânico desenvolvido por Shallenberger



Fonte: (SILVA, 2010, p. 19)

O modelo inicial que era para medição monofásica, foi logo adaptado para a medição trifásica, dentre outras modificações. Essas alterações, assim como desenvolvimentos posteriores, elaborados por outros pesquisadores, resultaram em simplificações de projeto, melhoria das características de operação e, conseqüentemente, melhor desempenho (10).

Entretanto, o princípio de funcionamento desses equipamentos manteve-se inalterado, até o início da década de 1990 (11), quando surge a tecnologia híbrida. Nessa tecnologia, um sistema eletrônico contabilizava as rotações do disco do



medidor e armazenava a quantidade de energia por segmento horário, isso é contabilizava separadamente o consumo de energia no horário de ponta (18h às 21h) e no horário fora de ponta (21h às 18h). Essa modernização começou a ser comercializada e utilizada nos consumidores de alta tensão, para possibilitar o faturamento de energia de forma horo-sazonal, que é o faturamento dependente do horário e do período do ano em que a energia foi consumida.

### **1.1.2 A Engenharia de Confiabilidade**

Os estudos de confiabilidade aplicados à engenharia são relativamente recentes e tiveram início no período da Segunda Guerra Mundial, principalmente devido a necessidade de alta confiabilidade dos aviões e mísseis utilizados nas operações de guerra. Em meio à guerra, em 1941, o engenheiro alemão Robert Lusser foi o primeiro homem a reconhecer a necessidade da engenharia de confiabilidade como uma disciplina distinta (12).

Lusser era um dos diversos engenheiros que, durante a Segunda Guerra Mundial, trabalharam no desenvolvimento dos mísseis V-1 e no final deste, percebeu-se conta de que todos os protótipos desenvolvidos apresentaram falhas enquanto testados, pois os mesmos explodiram antes e durante o voo ou aterrissando antes do alvo (13).

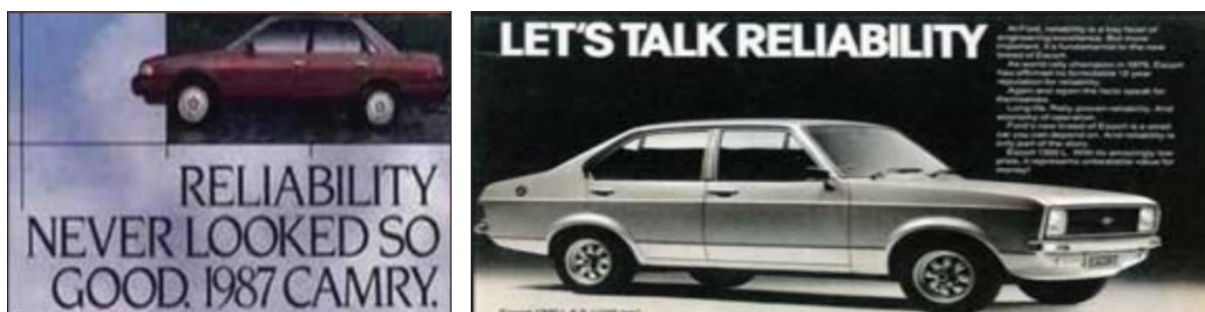
Após a Segunda Guerra, em 1951, é publicado o primeiro documento oficial que trata de confiabilidade. Nessa data, o então secretário de defesa norte americano, General George C. Marshall, através de uma diretiva, determina que todas as agências do Departamento de Defesa priorizem a confiabilidade de equipamentos militares eletrônicos.

Ainda na década de 50, com o impulso da Guerra Fria, houve o surgimento da indústria aeroespacial e eletrônica que, juntamente com a implantação da indústria nuclear, foram responsáveis por um grande salto no desenvolvimento de cálculos e aplicações voltadas à confiabilidade. Esses avanços foram intensificados na década seguinte com os programas espaciais Gemini, Mercury e Apollo, da NASA e, em 1963, a Universidade do Arizona tornou-se a primeira universidade de pesquisa a ensinar os conceitos de confiabilidade.

A partir da década de 80, a confiabilidade passa a ser explorada por empresas privadas em geral que promovem pesquisas e começam a implementar programas de confiabilidade, sendo a indústria automotiva a pioneira.

Nesse momento, o foco se volta para a aplicação da engenharia de confiabilidade e seu impacto subsequente nos consumidores e nos resultados financeiros. Na Figura 3, vemos exemplos de como a confiabilidade passou a ser o foco principal de campanhas publicitárias.

Figura 3 - Anúncios publicitários com foco em confiabilidade



Fonte: Site da WKB (14)

Em relação ao Brasil, verificou-se aplicações práticas da confiabilidade nos setores de telecomunicações, elétrico, de armamento e nuclear (15), que são setores onde a mesma é imprescindível.

Já em escala global, exigências como a redução mandatória de custos junto da necessidade de desenvolvimento rápido e da grande expectativa do consumidor a respeito da confiabilidade e da qualidade dos produtos e processos, tornam um programa de confiabilidade efetivo primordial para a obtenção desses resultados.

#### 1.1.2.1 A Engenharia da Confiabilidade Aplicada aos Medidores de Energia Elétrica

Quanto a confiabilidade aplicada aos medidores de energia elétrica, a aplicação é ainda mais recente. O primeiro fator que contribui com essa realidade é que durante décadas, quando a medição era feita de forma praticamente exclusiva por medidores eletromecânicos, não existia necessidade para os estudos de confiabilidade, pois esses equipamentos sempre foram extremamente robustos.

Como exemplo, tem-se o medidor D58 que foi projetado em 1958 e descontinuado em 2006, recebendo alterações apenas na qualidade dos materiais

(16). Em virtude dessa robustez, raramente os mesmos apresentavam defeitos antes do prazo regulatório de amortização, que é de 25 anos, o que não afetava o fluxo de caixa das empresas de distribuição e não motivava esse tipo de pesquisa.

Um outro fator relevante é o fato de, pela inexistência da cultura de estudos de confiabilidade na época de transição para a medição eletrônica na baixa tensão, não se atentou para a importância dos mesmos nesse momento de mudança do cenário. Esses começam a ser contemplados somente alguns anos após a implantação da nova tecnologia, quando as falhas prematuras começaram a ocorrer.

Cabe ainda, uma análise que reforça a importância dos ensaios de confiabilidade nessa nova realidade. Para os medidores do tipo de indução, devido a sua construção e pela precisão mecânica necessária, torna-se mais difícil o uso de materiais de menor qualidade, sem o comprometimento da precisão na medição. Essa por sua vez, sempre passou por ensaios metrológicos rígidos, descritos na “ABNT NBR 5313:1997 Aceitação de lotes de medidores de energia ativa – Procedimento” (17).

Na Figura 4 é apresentado um dos medidores eletrônicos de energia mais utilizados no mercado brasileiro:

Figura 4 - Medidor eletrônico monofásico



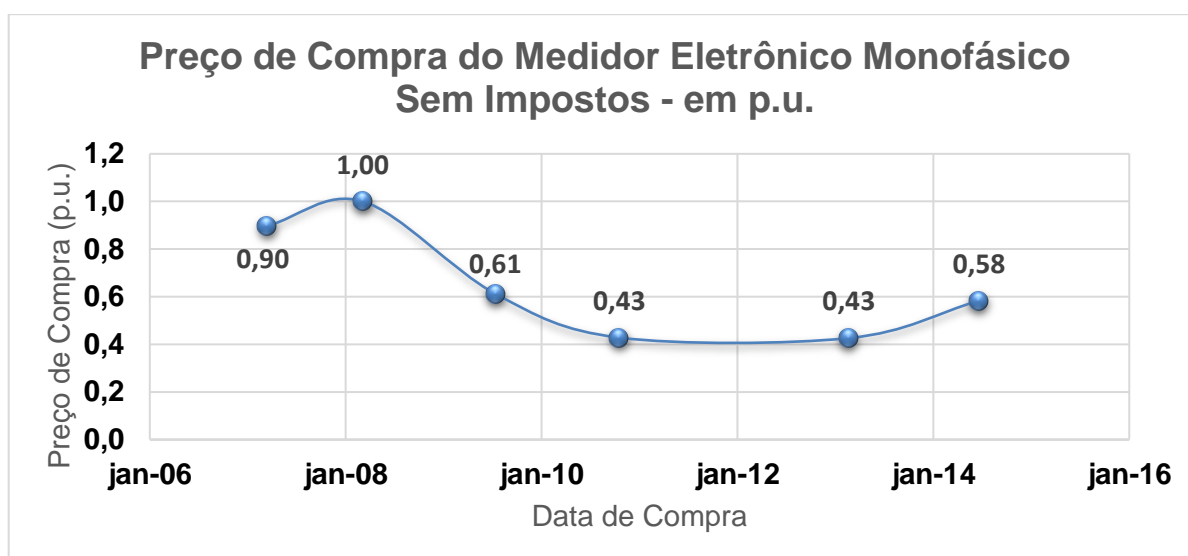
Fonte: Site da Eletra (18)

Um fator adicional nessa análise foi o fato de que, diferentemente do ocorrido com os medidores de indução, para a tecnologia eletrônica, notou-se a redução da qualidade dos componentes eletrônicos ao longo do tempo, em virtude de uma política agressiva de preços por parte dos fabricantes.

Esses itens, invariavelmente importados em grande escala da China, podem comprometer a vida útil do equipamento, sem comprometer a precisão na sua funcionalidade no momento da venda. Dessa forma, os equipamentos são aprovados nos testes de aceitação de lotes de medidores, mas tem vida útil reduzida.

No gráfico 1, é mostrado o histórico do preço de compra do medidor eletrônico monofásico por parte das distribuidoras do grupo EDP, que evidencia a política agressiva de preços citada e demonstra a queda acentuada do preço logo após a inserção da tecnologia no mercado.

Gráfico 1 - Histórico de Preço de Compra do Medidor Monofásico



Fonte: Elaboração do autor

Os dados utilizados para a elaboração desse gráfico foram obtidos no sistema de gestão da própria EDP, o SAP GUI e devido a questões de sigilo corporativo, o preço é apresentado em p.u. com referência no preço aplicado em 07/03/2008. Ademais, devido a variação do valor percentual dos impostos aplicados na compra durante os últimos anos, os preços apresentados são valores líquidos, livre de impostos.

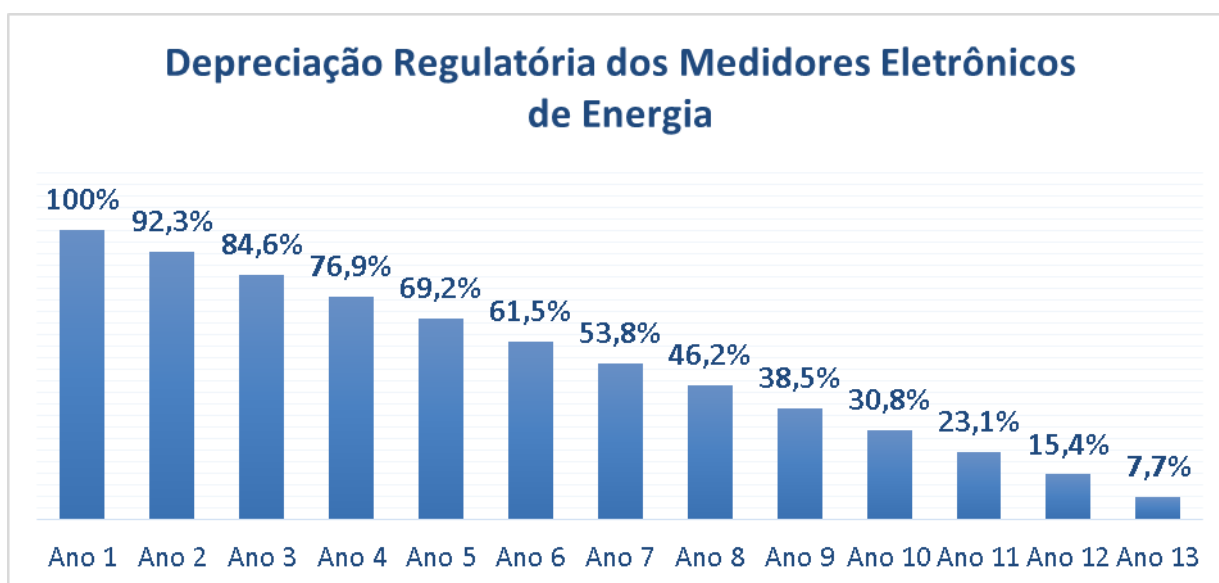
## 1.2 Justificativa

As distribuidoras de energia de todo o país são regulamentadas pela ANEEL, que dentre outras atribuições tem como prerrogativa estipular o tempo de depreciação regulatório para os equipamentos utilizados no setor. Para os medidores de energia eletrônicos, o prazo estabelecido é de 13 anos (19). Isto é, durante esse período, os

custos com os medidores e com os serviços de instalação associados são ressarcidos à distribuidora através da tarifa.

Todavia, se um medidor é retirado antes dos treze anos, o valor não depreciado vai para o balanço financeiro da empresa como prejuízo e este tem sido um acontecimento comum em muitas concessionárias de energia do Brasil. O Gráfico 2 apresenta como é estipulada essa depreciação ao longo do tempo.

Gráfico 2 - Depreciação Percentual Regulatória dos Medidores



Fonte: Elaboração do autor

Segundo a ABRADDEE, para sete distribuidoras de energia, a substituição prematura de medidores representou em 2012 uma perda financeira na ordem de R\$ 19,85 milhões, devido ao fato dos medidores terem sido retirados da base de ativos dessas distribuidoras sem terem sido totalmente depreciados e remunerados pela tarifa (3).

O valor apresentado ainda é extremamente conservador, pois existem outros custos intrínsecos ao processo que não foram contabilizados, como as perdas por faturamento abaixo do esperado, gastos com equipes de manutenção e gastos com recall do produto.

A respeito de estudos anteriores sobre o tema, é citado nas referências dois trabalhos semelhantes, o primeiro realizado por Thiago Santana em 2012 e em parceria com a Copel (Companhia Paranaense de Energia) e o outro, em 2014, em parceria com a Celpe (Companhia Energética de Pernambuco) por Bruno Kleinau.

Porém, não é possível uma associação direta, pois além de se tratar de regiões com climas distintos do estado do Espírito Santo, a política de substituição da tecnologia nessas empresas foi diferente da adotada pela EDP Escelsa. Além disso, o trabalho presente apresenta foco exclusivo nos medidores eletrônicos, diferentemente do primeiro supracitado e propõe uma metodologia diferente para os ensaios de vida acelerada, em relação ao segundo trabalho citado.

Portanto, diante de tal situação de prejuízo financeiro supracitada, das limitações de aplicação de outros trabalhos e por se tratar de um problema com consequências em diversas áreas das concessionárias como: gestão de ativos, medição, leitura, faturamento e planejamento de serviços, dentre outros, faz-se necessário estudos a respeito da confiabilidade dos medidores eletrônicos para se ter a real dimensão do problema e propor soluções.

### **1.3 Objetivos Gerais e Objetivos Específicos**

Os objetivos desse trabalho foram divididos em objetivos gerais e específicos, e suas descrições são expostas a seguir.

#### **1.3.1 Objetivos Gerais**

O presente trabalho tem como objetivos gerais a operacionalização de metodologia de análise de confiabilidade para os novos lotes de medidores, em contratos firmados a partir de julho de 2016 e, também, servir como base para a implantação de um programa permanente de engenharia de confiabilidade no setor de engenharia de medição da EDP Escelsa.

Essas serão ferramentas para prever e antever falhas, assegurar que os medidores adquiridos pelas distribuidoras de energia possuam qualidade em sua produção suficiente para funcionar durante sua vida útil regulatória, com confiabilidade de 85% ao fim deste prazo.

Caso contrário, os resultados dos ensaios de vida acelerada realizados a partir da metodologia estabelecida nesse presente trabalho, juntamente com um documento produzido com os resultados e a análise dos mesmos, servirão como embasamento de realização de ação mitigatória aos fabricantes, conforme estabelecido nos contratos de compra a partir de julho de 2016. Essa proposta, visa reduzir pela metade as falhas nesses novos lotes.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para se atingir esses objetivos gerais, o trabalho utilizará a norma “ABNT NBR 16078:2012 - Equipamentos de medição de eletricidade - Confiabilidade - Ensaio de confiabilidade - Vida acelerada por umidade e temperatura” (20), publicada pela ABNT em 03 de agosto de 2012. A mesma trata dos ensaios que são realizados para estimar a vida útil dos medidores, mas não existe um estudo para definir os parâmetros de umidade e temperatura nas condições de uso do estado do Espírito Santo.

Por esses motivos, será feita uma análise com base nos métodos estabelecidos na norma e aplicados para as condições do estado do Espírito Santo, para o estabelecimento de metodologia para os ensaios de vida acelerada, que serão utilizados nas análises de confiabilidade de novos lotes de medidores adquiridos.

Além disso, os principais conceitos de Engenharia de Confiabilidade aplicáveis a medidores de energia elétrica serão abordados e explorados, servindo como base para trabalhos futuros dentro da própria empresa.

### 1.4 Alocação de Recursos

Para a realização do projeto, é necessário a alocação de recursos que, somente em virtude da realização conjunta com a EDP Escelsa, foi possível. O principal deles vem da inevitabilidade de uso de software especializado. Para tanto, a EDP Escelsa adquiriu o software Weibull++ que é referência nesse tipo de segmento e atende perfeitamente as exigências computacionais.

Outro recurso que foi primordial para a realização do trabalho em alto nível foi a participação no curso “G400 – Fundamentos da Engenharia da Confiabilidade”, promovido pela Reliasoft, com carga horária de quarenta horas, e realizado na cidade de São Paulo entre 25 e 29 de Abril do presente ano. Neste curso foi adquirido grande parte do conhecimento teórico exigido pelo tema, além do conhecimento prático de análises via software.

Para o conhecimento teórico, são e continuarão sendo de grande importância as referências bibliográficas: “Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerado, FREITAS & COLOISMO” (21), “Accelerated Testing, NELSON” (22) e “Confiabilidade e Manutenção Industrial, FOGLIATTO & RIBEIRO” (13), que estão

disponíveis na biblioteca central da UFES, além da norma ABNT NBR 16078:2012 (20), adquirida pela EDP.

### **1.5 Descrição das Atividades Desenvolvidas**

O projeto foi dividido em quatro etapas de desenvolvimento, que seguem listadas e descritas a seguir:

1. Pesquisa e leitura sobre o tema

A primeira etapa consiste na pesquisa sobre o assunto, na busca de materiais bibliográficos, bem como artigos, dissertações e trabalhos de conclusão de curso com tema afim. Nessa etapa também está incluída a busca de informações com profissionais ligados diretamente ao tema.

2. Estudo teórico dos conceitos e modelos

Consiste no estudo e entendimento por completo dos conceitos estatísticos aplicados nas análises de confiabilidade bem como dos modelos que podem ser adotados nesse tipo de estudo.

3. Estabelecimento de metodologia para o ensaio de vida acelerada

Baseado na realidade encontrada com os dados de vida, e de acordo com a norma ABNT NBR 16078:2012, será estabelecida metodologia para o ensaio de vida acelerada para os medidores instalados no estado do Espírito Santo.

4. Apresentação do projeto

Essa etapa consiste na apresentação do trabalho e aprovação pelo Departamento de Engenharia Elétrica da UFES

### **1.6 Estrutura do Trabalho**

Para atingir os objetivos propostos na Seção 1.3 deste capítulo, este trabalho está organizado em cinco capítulos. Eles são apresentados na sequência:

O primeiro é o capítulo introdutório cuja atual seção faz parte. Neste capítulo são abordadas as informações necessárias para que se compreenda a que este trabalho se propõe, bem como seus objetivos e justificativas.

O segundo capítulo apresenta uma síntese das normas técnicas em vigor e aplicáveis no contexto do trabalho, bem com uma revisão bibliográfica referente à Engenharia da Confiabilidade. Neste capítulo também é apresentada a ferramenta computacional utilizada no trabalho, e que será utilizada em outros projetos, além de



uma descrição dos modelos estatísticos que serão aprofundados nos capítulos três e quatro.

O terceiro capítulo tem o objetivo de apresentar o modelo de distribuição de vida. São apresentadas as distribuições estatísticas mais difundidas e disponíveis no software mencionado. Ademais, as distribuições aplicáveis ao trabalho serão detalhadas na seção 3.2 e, de maneira mais aprofundada, a distribuição de Weibull na seção 3.2.4.

O quarto capítulo apresenta o modelo de Estresse-Vida. Além do conteúdo teórico a respeito do tema e do detalhamento dos ensaios, na Seção 4.3 é desenvolvida a metodologia para o ensaio de vida que será utilizada para os ensaios de vida acelerada dos medidores da EDP Escelsa.

Já o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e, na sequência, as referências bibliográficas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta, com detalhes, os ensaios descritos nas normas técnicas NBR ABNT 5313 e NBR ABNT 14521. Estas são as normas que estão em vigor para regulamentar os procedimentos de aceitação de lotes de medidores de energia elétrica. Além disso, há uma introdução da norma ABNT NBR 16078, abordando os ensaios propostos na norma.

Ademais, os principais conceitos de Engenharia de Confiabilidade que serão utilizados nos capítulos subsequentes também são abordados nesse capítulo. Por fim, há a apresentação da ferramenta computacional empregada no trabalho.

### 2.1 Normas Aplicáveis

#### 2.1.1 ABNT NBR 5313:1997

Apesar de, desde meados da década passada, a produção dos medidores eletromecânicos em grande escala ter sido descontinuada, a norma de aceitação de medidores aplicada para os medidores de indução continua em vigor e tem o seguinte título “ABNT NBR 5313: Aceitação de Lotes de Medidores de Energia Ativa – Procedimento” (17). Os exames e ensaios descritos na norma devem ser realizados na sequência que segue:

I. Ensaio de Conformidade ao Modelo Aprovado

Finalidade: Verificar se os medidores fabricados mantêm as características do modelo aprovado pelo INMETRO e se obedecem às respectivas especificações de aprovação.

II. Inspeção Geral

Finalidade: Verificar, através de uma inspeção visual, se existem defeitos de fabricação ou de montagem das diversas partes que compõem o medidor, que provavelmente podem acarretar danos físicos a pessoas e a bens materiais.

III. Exame de Placa

Finalidade: Verificar se os dados de placa de identificação estão de acordo com as características do medidor e se satisfazem as especificações do cliente.

IV. Ensaio de Tensão Aplicada

Finalidade: Verificar se o isolamento do medidor é satisfatório aplicando uma tensão de 2 kV durante 10 segundos aos terminais do medidor.

- V. **Marcha em Vazio**  
Finalidade: Verificar se o medidor está devidamente calibrado e se não existem dissimetrias eletromagnéticas. Aplica-se ao circuito de potencial do medidor 110% da tensão nominal com frequência nominal. O elemento móvel, isso é, o disco, não deve efetuar uma rotação completa em 15 minutos.
- VI. **Corrente de Partida**  
Finalidade: Verificar se o medidor está ajustado e se existem atritos anormais sobre o elemento móvel que prejudiquem o desempenho do medidor. O ensaio deve ser feito sob tensão de calibração, fator de potência unitário e 80% da corrente nominal durante um tempo pré-determinado. Com isso, o elemento móvel deve efetuar uma rotação completa. A duração do ensaio é calculada a partir de dados de placa dos equipamentos.
- VII. **Calibração**  
Finalidade: Verificar se os medidores foram devidamente ajustados. Isso é, verificar se o valor medido está dentro da faixa percentual de erro aceitável para cada classe de medidor.
- VIII. **Exame de Registrador**  
Finalidade: Verificar se existem defeitos de fabricação ou de montagem nas diversas peças que compõem o registrador. Isso é, verificar se o valor indicado é, de fato, o valor de energia que percorreu o medidor.

### **2.1.2 ABNT NBR 14521:2011**

Com o advento dos primeiros medidores eletrônicos em 1990, foi elaborada a norma de testes de aceitação para esse tipo de equipamento, e assim como a norma aplicáveis aos medidores eletromecânicos, abordava somente apenas testes de mortalidade infantil (3). Desde então, a norma utilizada para aceitação dos medidores eletrônicos passou por atualizações e revisões. Atualmente, a que está em vigor é a “ABNT NBR 14521: Aceitação de Lotes de Medidores Eletrônicos” (23).

Diferentemente da norma ABNT NBR 5313, os exames e ensaios descritos na norma não possuem uma sequência a ser seguida, podendo ser realizados em qualquer ordem, em função da logística dos laboratórios. Entretanto, esta norma estabelece as condições para a realização dos ensaios. A seguir, são apresentados os ensaios e suas condições, bem como o detalhamento dos mesmos:

- Condições de Ensaio

Os ensaios devem ser feitos utilizando tensões e correntes com forma de onda senoidal, cujo fator de distorção não exceda 5% para medidores Classe A, os quais tem o erro máximo admissível de 2%. Para medidores os medidores das Classes B, C e D, que admitem os erros máximos de 1%, 0,5% e 0,2% respectivamente, o fator de distorção não deve exceder 2%.

O desequilíbrio entre as amplitudes das tensões de fase-fase e fase-neutro, em relação ao valor médio, não pode ser maior que 5% e o erro nos deslocamentos de ângulo de fase de cada uma das tensões e correntes não pode exceder  $\pm 6^\circ$ .

- Detalhamento dos Ensaios:

- i. Ensaio Visual de Correspondência ao Modelo Aprovado

Finalidade: Verificar se os medidores fabricados mantêm as características do modelo aprovado pelo INMETRO e se obedecem às respectivas especificações de aprovação.

- ii. Inspeção Geral

Finalidade: Averiguar a possível existência de falhas nas diversas peças e conjuntos que compõem o medidor e que possam acarretar danos físicos a pessoas e a bens materiais, diminuir a vida útil do medidor ou exigir maior manutenção.

Execução: Verificar se os dados de placa e o esquema de ligação do medidor estão perfeitamente indicados; examinar as condições físicas da base, da tampa principal, da tampa do bloco de terminais, dos pontos de selagem e do suporte de fixação; conferir quanto à existência de materiais soltos, sujeira, oxidações, parafusos desapertados e vestígios de aquecimento.

- iii. Tensão Aplicada

Finalidade: Verificar se o isolamento do medidor é satisfatório aplicando uma tensão de 2 kV durante 10 segundos aos terminais do medidor.

- iv. Controle das funções e grandezas com elevação de temperatura

Finalidade: Verificar se os medidores não registram consumo indevidamente sob condições de temperatura elevada.

Execução: O medidor é submetido, durante duas horas, à temperatura de no mínimo  $60^\circ\text{C}$ , tensão de 115% da tensão nominal do medidor e corrente elétrica

nula. Além disso, no decorrer do ensaio, o medidor deve sofrer dez faltas de energia de no mínimo um minuto e espaçadas de no mínimo cinco minutos.

Resultado: O medidor é considerado aprovado se não forem emitidos mais de 5 pulsos na saída de verificação do medidor. Um pulso no medidor eletrônico é nada mais do que a uma emissão luminosa no LED indicador de operação. A relação entre a quantidade de pulsos e a energia consumida varia dentre os modelos e é dada por meio de uma constante com a unidade de Wh/pulso.

v. Verificação do limite inferior da tensão de alimentação

Finalidade: Verificar se o medidor funciona no limite inferior da faixa de operação.

Execução: O ensaio é realizado aplicando-se 80% da menor tensão nominal e corrente nominal.

Resultado: O medidor é considerado aprovado se emitir pulsos pelo dispositivo de verificação e atender aos limites de erros de sua respectiva classe e não apresentar anomalias em seu funcionamento.

vi. Corrente de partida

Finalidade: Verificar o início de registro de energia elétrica com uma porcentagem da corrente nominal que é dependente da classe do medidor.

Execução: O ensaio deve ser realizado com tensão nominal, frequência nominal, fator de potência unitário e corrente específica para cada classe de medidores. O tempo do ensaio é calculado a partir de dados de placa dos equipamentos.

Resultado: O medidor é considerado aprovado se forem constatados no mínimo dois pulsos em um intervalo de tempo calculado baseado na norma e se o erro permanecer entre -50% e +100% para as condições propostas no ensaio.

vii. Ensaio de Exatidão

Finalidade: Verificar se os medidores foram devidamente ajustados.

Execução: O ensaio deve ser realizado na corrente nominal para o fator de potência unitário, fator de potência 0,5 indutivo, e fator de potência 0,8 capacitivo. Também deve ser realizado com 10% da corrente nominal e fator de potência unitário. Em todos os casos utiliza-se a tensão nominal.

Resultado: O medidor é considerado aprovado se os erros apresentados estiverem dentro dos limites estabelecidos pela norma para cada classe.

viii. Ensaio do Mostrador

Finalidade: Verificar se a indicação da energia medida corresponde à energia consumida.

Execução: Aplica-se ao medidor uma carga por um tempo previamente definido e verifica-se se a energia do mostrador corresponde à energia consumida.

ix. Verificação das Saídas Periféricas (saída de comunicação, saída de pulso)

Finalidade: Verificar a adequação e funcionalidades de todas as saídas periféricas.

Execução: O ensaio deve ser realizado utilizando os procedimentos e equipamentos especificados pelo fabricante.

Resultado: O medidor é considerado aprovado se não apresentar nenhuma indicação de erro e a saída periférica cumprir sua função.

### 2.1.3 ABNT NBR 16078:2012

Observa-se que, apesar do grande número de ensaios metrológicos que podem identificar, facilmente, medidores com problemas de fabricação no momento da aceitação do lote, nenhum dos ensaios mencionados nas normas ABNT NBR 5313 e ABNT NBR 14521 visam a confiabilidade dos equipamentos ao longo do tempo e os ensaios de vida acelerada não são nem citados.

Porém, com a inserção massiva dessa tecnologia no mercado, nem sempre apenas uma validação para aceitação é capaz de evitar componentes falsificados, lotes com defeitos, deficiências na rastreabilidade, entre outros. Além dos ensaios de aceitação, é necessário um acompanhamento constante da performance ao longo da vida dos medidores, para garantir tanto as características funcionais como a robustez do produto.

Entretanto, a inexistência de normas técnicas brasileiras relacionadas à confiabilidade se estendeu até agosto de 2012, quando a ABNT publicou a norma “ABNT NBR 16078:2012 - Equipamentos de medição de eletricidade - Confiabilidade - Ensaio de confiabilidade - Vida acelerada por umidade e temperatura” (20), que foi a primeira norma a abordar questões de vida útil dos medidores eletrônicos.

Essa norma, no entanto, possui algumas limitações significativas, como o fato de não existir um estudo para definir os parâmetros de umidade e temperatura nas condições de uso mais adequados por região do Brasil, uma vez que a norma

brasileira é, basicamente, uma tradução da norma internacional (3) “IEC 60300-3-5:2001, Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles” (24). Além do mais, não houve qualquer alteração nas normas de aceitação de lotes no sentido de incluir esse tipo de ensaio nas mesmas.

A norma brasileira é aplicável aos medidores de energia elétrica e dispositivos conectados aos medidores como elementos de comunicação, controle de carga, dentre outros. O detalhamento dos ensaios propostos na mesma será abordado no capítulo 4.

## **2.2 Engenharia de Confiabilidade**

A Engenharia de Confiabilidade é o ramo da engenharia voltado para o estudo confiabilidade de sistemas de forma geral, durante o seu ciclo de vida e tem como foco a otimização de produtos ou processos que proporcionem o melhor desempenho com o menor custo.

Em alguns campos da engenharia, a confiabilidade é vital: construções como usinas nucleares, aviões, submarinos, são intoleráveis a falhas. Entretanto, ultimamente a confiabilidade tem tido um grande avanço no setor de manutenção das empresas, com o intuito de aumentar a disponibilidade dos equipamentos e manter o parque fabril com a maior disponibilidade possível.

### **2.2.1 Definições de Confiabilidade**

Existem diversas definições de confiabilidade de acordo com diversos autores e órgãos reguladores (25). As definições de confiabilidade mais difundidas são apresentadas a seguir:

- European Organization for Quality Control (1965): “É a medida da capacidade de um produto funcionar corretamente, por um período e em ambiente definidos e é avaliada como uma probabilidade” (26).
- “US Military Handbook” (1970): “A probabilidade que um item irá executar sua função sobre determinadas condições e durante um determinado período de tempo” (26).
- UK Ministry of Defence (1979): “A aptidão de um item em executar, ou ser capaz de executar, uma determinada função sobre determinadas condições

sem falhar por um período de tempo estabelecido ou de operação é também expressa como uma probabilidade” (26).

- ABNT NBR-5462:1994: “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. (27)

Diante das definições apresentadas, destacam-se alguns aspectos importantes a serem avaliados em uma análise de confiabilidade. Primeiramente a função do equipamento deve ser claramente definida. Também é importante avaliar o meio físico que envolve o equipamento, assim como os recursos de instalação, manutenção e a interface com o usuário. (28)

Finalmente, é fundamental para uma análise de confiabilidade a determinação do período de utilização do equipamento, este período nem sempre é medido como uma grandeza temporal (29), como no caso dos medidores de energia elétrica, mas também pode ser medido como uma distância percorrida ou ainda através de ciclos de operação em determinados equipamentos.

Além disso, a definição da confiabilidade como uma probabilidade é muito interessante, pois permite a sua quantificação de forma que possa ser entendida de forma mais ampla, permitindo o uso das várias ferramentas estatísticas. (26)

## 2.2.2 Conceitos Estatísticos e de Engenharia de Confiabilidade

A seguir, serão apresentados os conceitos estatísticos e de Engenharia de Confiabilidade que serão utilizados no trabalho.

### 2.2.2.1 Pdf - Probability Density Function

Uma Função de Densidade de Probabilidade (pdf) é uma função  $f(x)$  que satisfaz as seguintes propriedades:

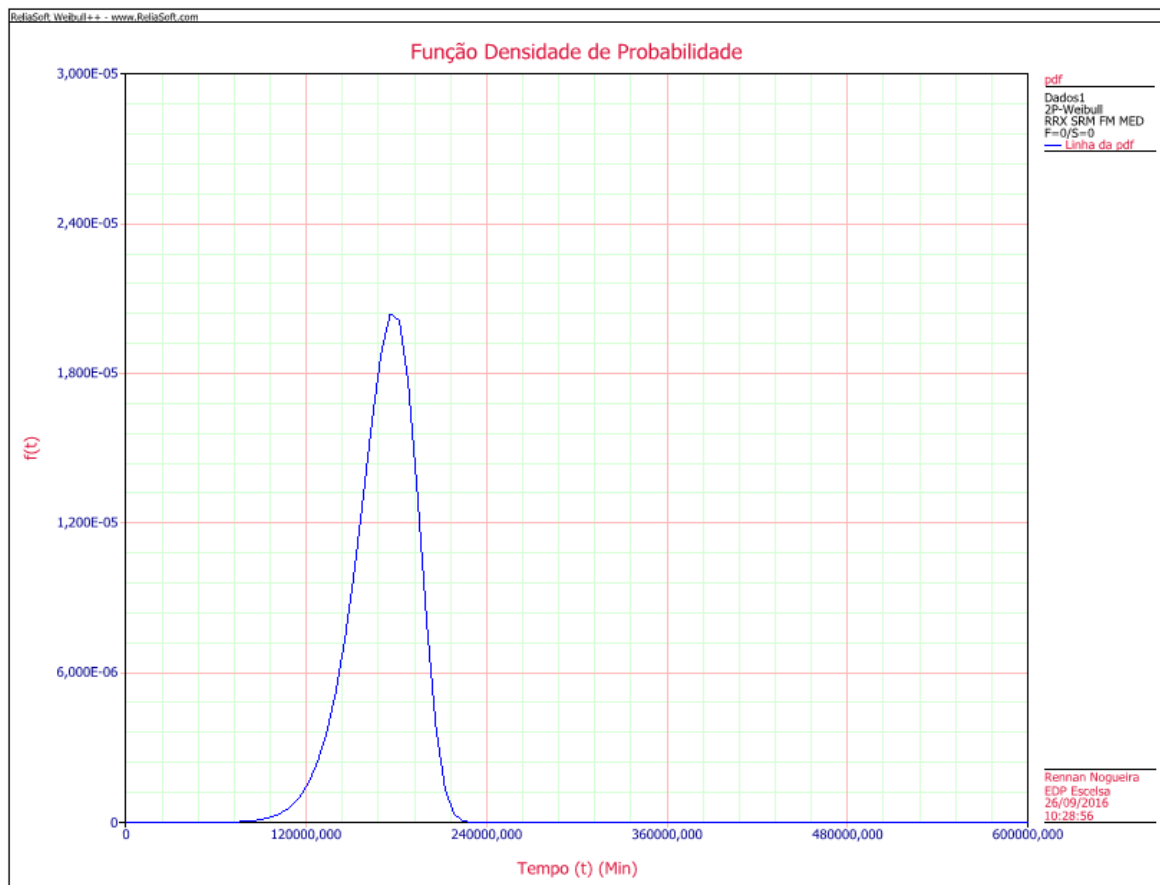
- $f(x) \geq 0$
- $\int f(x) dx = 1$
- Dada uma função  $f(x)$  satisfazendo as propriedades acima, então  $f(x)$  representa alguma variável aleatória contínua  $x$ , de modo que:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx \quad (1)$$



Ou seja, a probabilidade de que  $x$  assume um valor no intervalo  $[a, b]$  é a área sob a função de densidade de  $a$  a  $b$ , como mostrado acima. Quando aplicada à Engenharia de Confiabilidade, a pdf representa a frequência relativa dos tempos de falha em função do tempo. A Figura 5 a seguir ilustra um exemplo prático de uma pdf.

Figura 5 - Exemplo de pdf



Fonte: Elaboração do autor

### 2.2.2.2 Cdf - Cumulative Density Function

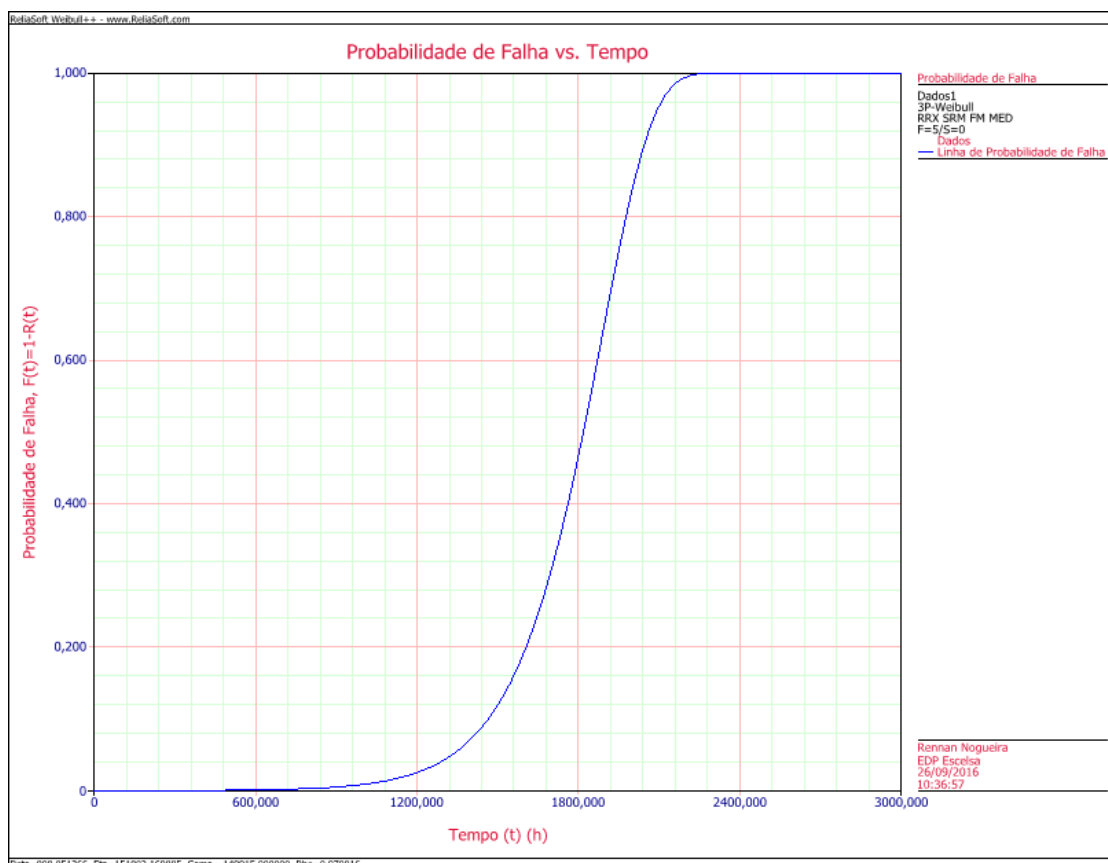
Conforme visto acima, para obter a probabilidade de falha até certo tempo a partir da pdf é necessário calcular a área abaixo da curva. Alternativamente, a Função Distribuição Acumulada (cdf) fornece esse valor diretamente.

Portanto, a cdf é uma função  $F(a)$  de uma variável aleatória  $x$  é definida por:

$$F(a) = P(X \leq a) = \int_{-\infty}^a f(X) dX \quad (2)$$

Onde, para uma variável aleatória  $a$ ,  $F(a)$  é a probabilidade de que o valor observado seja no máximo  $a$ . A Figura 6 a seguir ilustra a cdf correspondente a pdf da Figura 5.

Figura 6 - Exemplo de cdf



Fonte: Elaboração do autor

### 2.2.2.3 As funções confiabilidade e não-confiabilidade

A Função de Confiabilidade  $R(t)$  é definida como a probabilidade de um produto desenvolver sua função sem falhar até um certo tempo  $t$ . Em termos probabilísticos, isso é escrito em função da variável de interesse  $T$ , que é o tempo até a ocorrência da falha, como sendo:

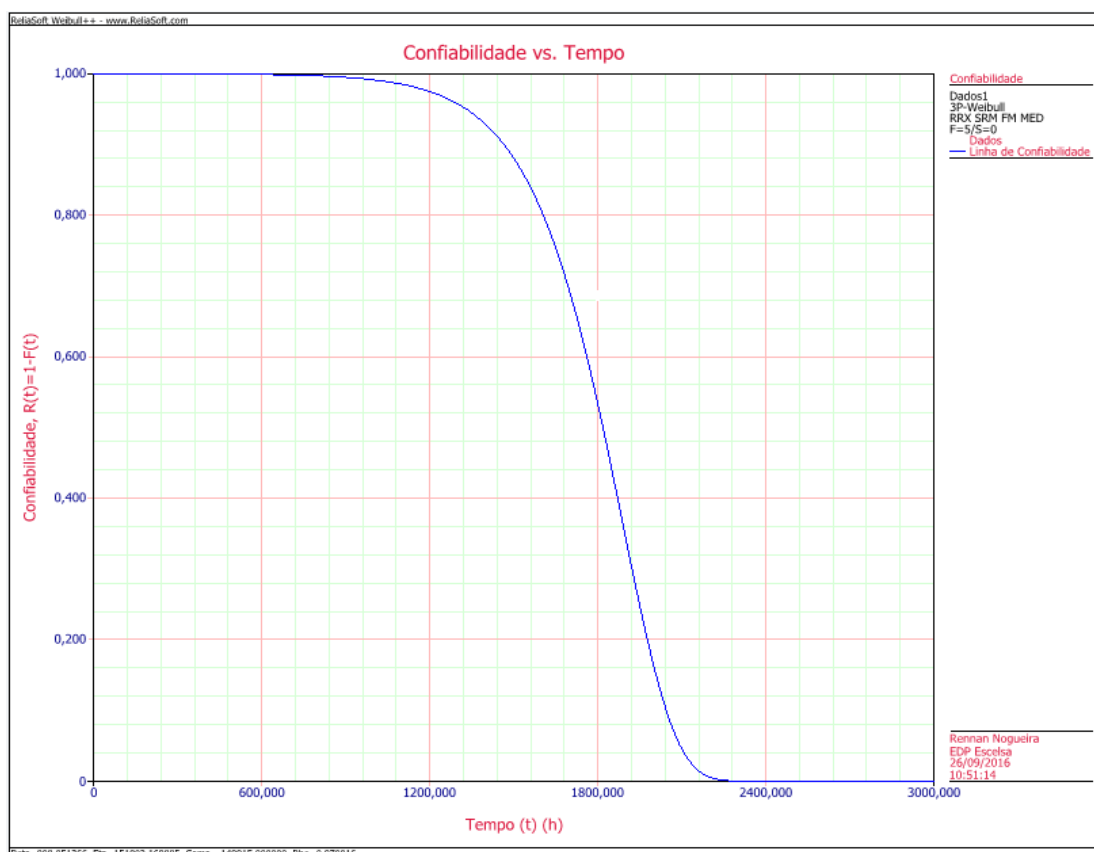
$$R(t) = P(T \geq t) \quad (5)$$

Já em termos matemáticos, a função pode ser escrita como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (6)$$

A Figura 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**a seguir ilustra, representativamente, a função confiabilidade relativa a pdf da Figura 5.

Figura 7 - Exemplo de função de confiabilidade



Fonte: Elaboração do autor

Uma vez definida, pode-se definir também a função Não-Confiabilidade, denominada por  $Q(t)$ , onde  $t$  é a variável tempo. Para isso, basta subtrair essa probabilidade de 1:

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (7)$$

Uma vez que esta função define a probabilidade de falha até um determinado tempo, podemos considerar essa a função de insegurança.

Com essas definições, é possível obter a função não-confiabilidade a partir da pdf, bem como o contrário:

$$Q(t) + R(t) = 1$$

$$Q(t) = 1 - R(t)$$

$$Q(t) = 1 - \int_t^{\infty} f(t) dt$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (8)$$

E invertendo:

$$f(t) = \frac{d(Q(t))}{dt} \quad (9)$$

#### 2.2.2.4 Função confiabilidade condicional

A Confiabilidade condicional é a probabilidade de sucesso de uma unidade completar uma missão  $t$ , dado que já se sabe que esta mesma unidade completou uma missão de duração  $T$ . Em outras palavras, é a probabilidade de atingir  $(T + t)$  dado que já atingiu o tempo  $T$ . A função de confiabilidade condicional é dada por:

$$R(T, t) = \frac{R(T + t)}{R(T)} \quad (10)$$

#### 2.2.2.5 Taxa de falha

A falha acontece quando componentes, produtos ou sistemas complexos deixam de executar suas funções para as quais foram destinados. (16). Já a função taxa de falhas, que é uma das métricas mais utilizadas em confiabilidade, determina o número de falhas que ocorrem por unidade de tempo.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (11)$$

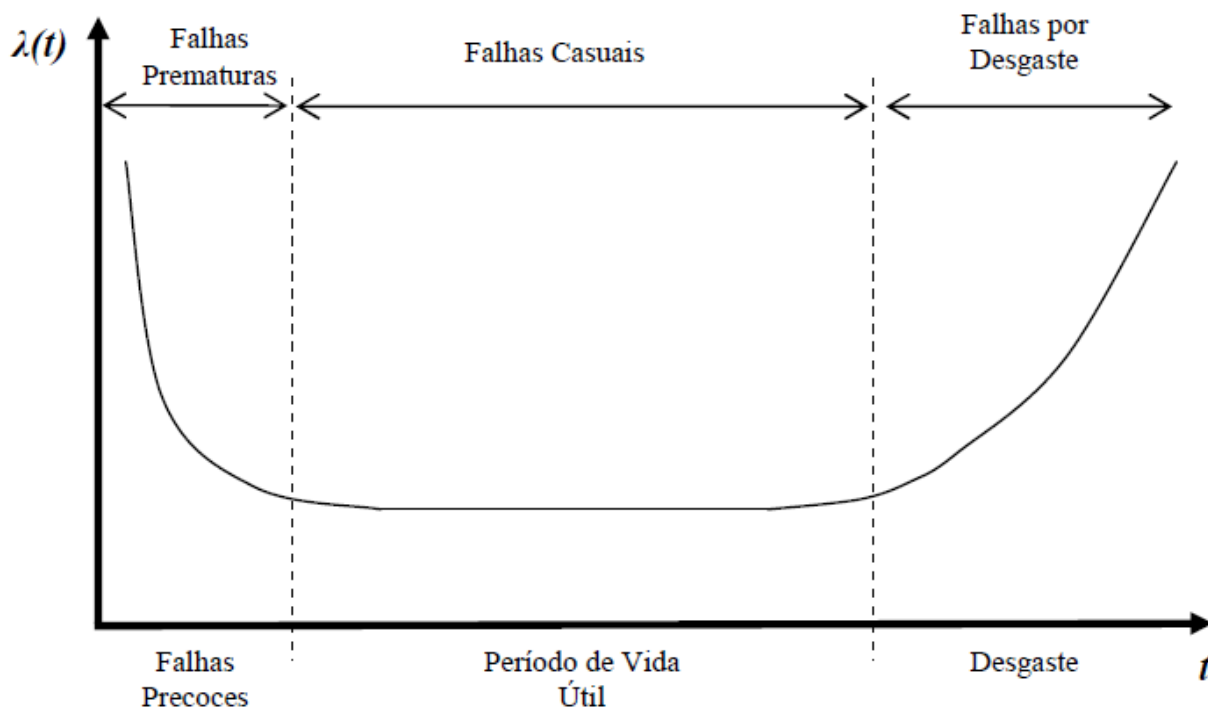
Isto é a taxa de falha instantânea, também conhecida como a função de risco. Ela é útil para caracterizar o comportamento de falha de um componente, determinar a alocação de equipe de manutenção e o planejamento de medidores de energia para reposição em campo (3).

A taxa de falha de um equipamento também pode ser expressa em função do número de falhas ocorridas e do tempo total de observação do equipamento, ou seja:

$$\lambda(t) = \frac{\text{Número de falhas}}{\text{Tempo de Observação}} \quad (12)$$

A taxa de falha de um componente é modelada através da curva da banheira. As regiões da curva estão associadas com os períodos característicos da vida do componente, que são a mortalidade infantil, vida útil e desgaste (30). O gráfico ilustra a curva da banheira, bem como o detalhamento de cada período da mesma é apresentado a seguir.

Gráfico 3 - Representação da Curva da Banheira



Fonte: LAFRAIA,2001

- Período I

Designado como período de falhas prematuras ou, em analogia com seres humanos, mortalidade infantil. Nesta fase de falhas precoces, a taxa de falha decresce em um curto período de tempo e as falhas são geralmente atribuídas à fraqueza de materiais, componentes com defeitos de fabricação, erros de instalação e montagem inapropriada.

- Período II

Designada como período de taxa de falhas constante. Durante este período, que normalmente abrange a maior parte da vida útil do componente ou do sistema, as falhas são aleatórias e a taxa de falha é aproximadamente constante. Em uma analogia com a população humana, as mortes nesta parte da curva da banheira são devidas a acidentes ou doenças infecciosas (28).

- Período III

Designada como período de falhas devido ao desgaste. Neste período a taxa de falhas é crescente em um curto período de tempo, correspondendo ao fim da vida útil do equipamento, geralmente devido a processos de

deterioração, fadiga, corrosão, dentre outros. O vertiginoso aumento da taxa de falha fundamenta o critério para substituição de peças e equipamentos que têm manutenção pautada em confiabilidade e, também, determina a vida útil do produto ou sistema.

### 2.2.2.6 MTTF – Mean Time to Failure

O tempo médio até a falha, MTTF (do inglês, Mean Time to Failure), é função de vida média, que proporciona uma medida do tempo médio de operação até a falha e é dada por:

$$\bar{T} = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (13)$$

O resultado dessa integral é o tempo médio estimado até a falha  $\bar{T}$ .

O MTTF, apesar de um índice de desempenho de confiabilidade, não fornece qualquer informação sobre a distribuição de falha do equipamento em questão, por isso, não é prudente usar o MTTF como a única métrica de confiabilidade de um equipamento.

### 2.2.2.7 Vida mediana

Vida mediana,  $\check{T}$ , é o valor da variável aleatória, que tem exatamente a metade da área da Função Densidade de Probabilidade ao seu lado esquerdo e a outra metade ao seu lado direito. A mediana é obtida através da resolução da equação abaixo para  $\check{T}$ .

$$\int_{-\infty}^{\check{T}} f(t) dt = 0,5 \quad (14)$$

### 2.2.2.8 Vida modal

A vida modal, ou moda, é o valor de  $t$  que satisfaz a equação:

$$\frac{d(f(t))}{dt} = 0 \quad (15)$$

Para uma distribuição contínua, a moda é o valor de  $t$ , que corresponde ao máximo valor da densidade de probabilidade, isto é, o valor para o qual a pdf tem seu valor máximo, ou o pico da curva.

### 2.2.3 Ferramenta Computacional

Os modelos matemáticos utilizados na engenharia de confiabilidade, e que serão expostos nos capítulos seguintes, são bastante complexos para serem trabalhados sem o auxílio de uma ferramenta computacional específica. Após análise das ferramentas disponíveis no mercado e de troca de experiência com profissionais da área, foi adquirido dentro desse projeto o software Weibull++ para análise de dados de vida, além de um treinamento direcionado para essas análises, via software, e técnicas relacionadas

O software Weibull++ é o padrão para análise de dados de vida utilizado por várias companhias no mundo inteiro, como por exemplo Apple Computer Inc, Nasa, Motorola, Ford, Petrobrás, Boeing Company, entre outras (3). Desenvolvido por uma equipe de especialistas da ReliaSoft, esse software realiza a análise de dados de vida utilizando mais de 13 distribuições estatísticas, com ênfase para todas as formas da distribuição Weibull.

O Weibull++ oferece um conjunto completo de ferramentas para a análise de dados de vida, permitindo diversos tipos de cálculos, gráficos e relatórios. O software suporta diversas distribuições e também inclui outras ferramentas para análises relacionadas à confiabilidade, incluindo análise de dados de garantia, análise de degradação, análise de dados não paramétricos e análise de eventos recorrentes, que apesar de não se aplicarem ao contexto específico desse trabalho, podem ser utilizadas em aplicações futuras.

A seguir são apresentadas algumas das aplicações práticas do Weibull++:

1. Analisar a confiabilidade de produtos, sistemas e processos;
2. Determinar o período ideal de garantia;
3. Realizar previsões de orçamento para peças de reposição;
4. Prever os retornos de garantia, também conhecido como *forecast*;
5. Determinar períodos para manutenção preventiva;
6. Analisar quantitativamente os riscos de falha em equipamentos;
7. Comparar a confiabilidade entre fabricantes e/ou projetos.

## 2.2.4 Métodos Estatísticos

Para trabalhar com a previsão da vida útil dos medidores eletrônicos, ou qualquer outro tipo de equipamento, é necessário utilizar métodos estatísticos de avaliação de confiabilidade. Esses métodos estatísticos baseiam-se no processamento de dados de tempos até falha dos equipamentos e existem dois modelos estatísticos para trabalhar com a confiabilidade:

### I. Modelo de Distribuição de Vida

A distribuição de Vida de um equipamento é uma função de densidade de probabilidade que é obtida por um modelo matemático, dentre vários, que se mostrará mais robusto e confiável para as análises de medidores eletrônicos de energia. (21)

A pdf é a função base para qualquer análise de confiabilidade, pois, a partir dela e utilizando um modelo matemático, é possível obter informações como probabilidade de falha em um dado instante de tempo, taxa de falha em um dado instante de tempo, vida média (MTTF) e a probabilidade de funcionamento ao longo da vida útil, dentre outras características. (22)

### II. Modelo de Estresse-Vida

O modelo de estresse-vida baseia-se em submeter os medidores a ensaios com determinadas condições de estresse, que não extrapolem os limites de projeto, de modo a acelerar a falha durante o ensaio.

Após a obtenção do tempo até a falha na condição de estresse, são utilizados modelos matemáticos, que no caso desse trabalho serão os modelos de Arrhenius para a temperatura e de Eyring para a umidade, e com isso, determinar o tempo de falha na condição de uso através de outro modelo matemático, para a obtenção da pdf.



### 3 MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE VIDA

A análise de dados de vida utiliza metodologias estatísticas para construir modelos probabilísticos a partir de dados de vida. Esses modelos são utilizados para realizar previsões precisas a respeito da confiabilidade dos itens em análise.

Entretanto, os verdadeiros valores da confiabilidade de um produto em uso nunca serão conhecidos, pois esse valor só será conhecido quando todos os produtos já tiverem falhado. Tem-se então o objetivo da análise de dados de vida que é prever, com precisão, este valor real.

No ramo da estatística existem diversas distribuições contínuas de probabilidade. Essas distribuições foram formuladas por estatísticos, matemáticos e/ou engenheiros com o intuito de modelar matematicamente ou representar determinado comportamento.

Cada uma delas tem sua pdf definida matematicamente em função de dois, três ou mais, parâmetros. Uma vez definidos esses parâmetros, a pdf do modelo é obtida e, então, a distribuição estatística é totalmente descrita, pois todas as funções importantes em engenharia de confiabilidade e análise de dados de vida podem ser derivadas a partir da pdf, conforme visto no capítulo anterior.

Dentre as distribuições mais conhecidas estão: a distribuição Normal, amplamente estudadas nas disciplinas de estatística dos cursos de engenharia, e a distribuição de Weibull, formulada em 1954 por Waloddi Weibull, que é amplamente utilizada pelo seu vasto campo de aplicações.

A quantidade de distribuições probabilísticas é enorme, no entanto algumas distribuições tendem a representar melhor os dados de vida e são mais comumente chamados de distribuições de vida. O software Weibull++ disponibiliza o uso de onze distribuições de vida. São elas:

- Exponencial
- Weibull
- Lognormal
- Normal
- Gamma
- Gamma Generalizada
- Logística

- Loglogística
- Gumbel
- Weibull Mista
- Exponencial Mista

A seguir, é feita uma descrição dos parâmetros que são comuns as distribuições, além da síntese das distribuições mais relevantes para a aplicação com medidores de energia elétrica.

### 3.1 Parâmetros Comuns às Distribuições

A complexidade das funções matemáticas que descrevem as distribuições probabilísticas depende, em geral, da quantidade de variáveis de cada uma delas. Quanto maior o número de parâmetros, maior costuma ser a complexidade da distribuição.

Para as distribuições de vida utilizadas nos estudos de confiabilidade e análise de dados de vida que foram descritas anteriormente, esse número não é superior a três parâmetros. Estes três parâmetros são geralmente conhecidos como o parâmetro de escala, parâmetro de forma e parâmetro de localização. Dentre esses, o de maior importância é o parâmetro de escala, já que todas as distribuições usadas em confiabilidade possuem um parâmetro de escala. No caso de distribuições de um único parâmetro, esse é o parâmetro de escala. O parâmetro de escala define onde a maior parte da distribuição encontra-se, ou como é a dispersão dos dados da distribuição (3) .

O parâmetro de forma, como o nome sugere, altera a forma gráfica de uma distribuição. Em algumas distribuições, como o exponencial ou normal, não existe explicitamente a figura do parâmetro de forma, pois essas possuem uma forma já pré-definida e invariável.

No caso de uma distribuição normal, por exemplo, a forma é a conhecida forma de sino, motivo pelo qual é também chamada de Curva do Sino. O efeito do parâmetro de forma de uma distribuição se reflete nas formas da pdf, da função confiabilidade e da função de taxa de falha.

O parâmetro de localização é usado para mudar a distribuição em uma direção ou outra no eixo temporal. Em outras palavras, este parâmetro que geralmente é denotado como  $\gamma$ , define a localização da origem de distribuição. Em termos de

distribuições de vida, o parâmetro de localização representa quando começaram a surgir falhas nos equipamentos avaliados.

Esse parâmetro tem aplicações práticas em análises de modo de falha específicas, onde é possível ter a garantia de que não haverá o acontecimento dessa falha até certo tempo. Um exemplo prático dessa utilização é na análise de falha por desgaste de pneus de veículos, onde é possível garantir que esse tipo de falha não ocorre antes de, por exemplo, mil quilômetros.

### 3.2 Distribuições de Vida

Dentre as distribuições de vida citadas anteriormente, serão abordadas com mais detalhes nessa seção a distribuição normal, devido a sua importância histórica e por ser a mais difundida; além das distribuições que tem aplicabilidade para os ensaios de vida acelerada quais sejam lognormal, exponencial e Weibull.

#### 3.2.1 Distribuição Normal

A Distribuição Normal tem uma história bastante longa e está ligada à descoberta das probabilidades em matemática. O responsável mais direto da curva normal foi Abraham de Moivre, matemático francês exilado na Inglaterra, que a definiu em 1730.

O sucesso da descoberta foi rápido e grandes nomes passaram a trabalhar sobre a curva normal, tais como Laplace, que em 1783 a utilizou para descrever a distribuição dos erros, e Gauss, que em 1809 a empregou para analisar dados astronômicos e tornou-a conhecida e por isso, a curva normal é chamada de distribuição de Gauss.

Sua importância se deve a vários fatores, entre eles podemos citar o teorema central do limite, que é um resultado fundamental em aplicações práticas e teóricas. Esse teorema garante que, em geral, mesmo que os dados não sejam distribuídos segundo uma normal a média dos dados converge para uma distribuição normal conforme o número de dados aumenta (31).

A pdf da Distribuição Normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (16)$$

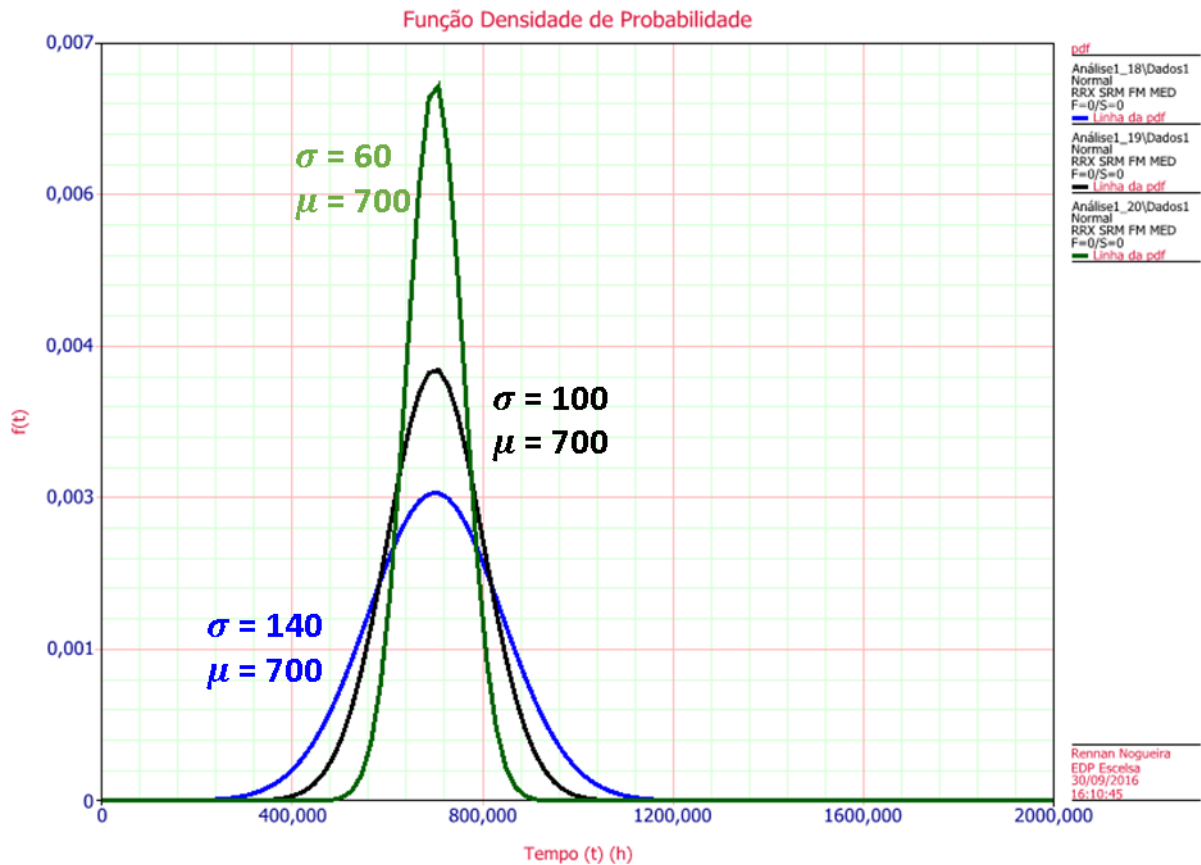
Onde:

$\sigma$  é o desvio padrão, correspondente ao parâmetro de forma;

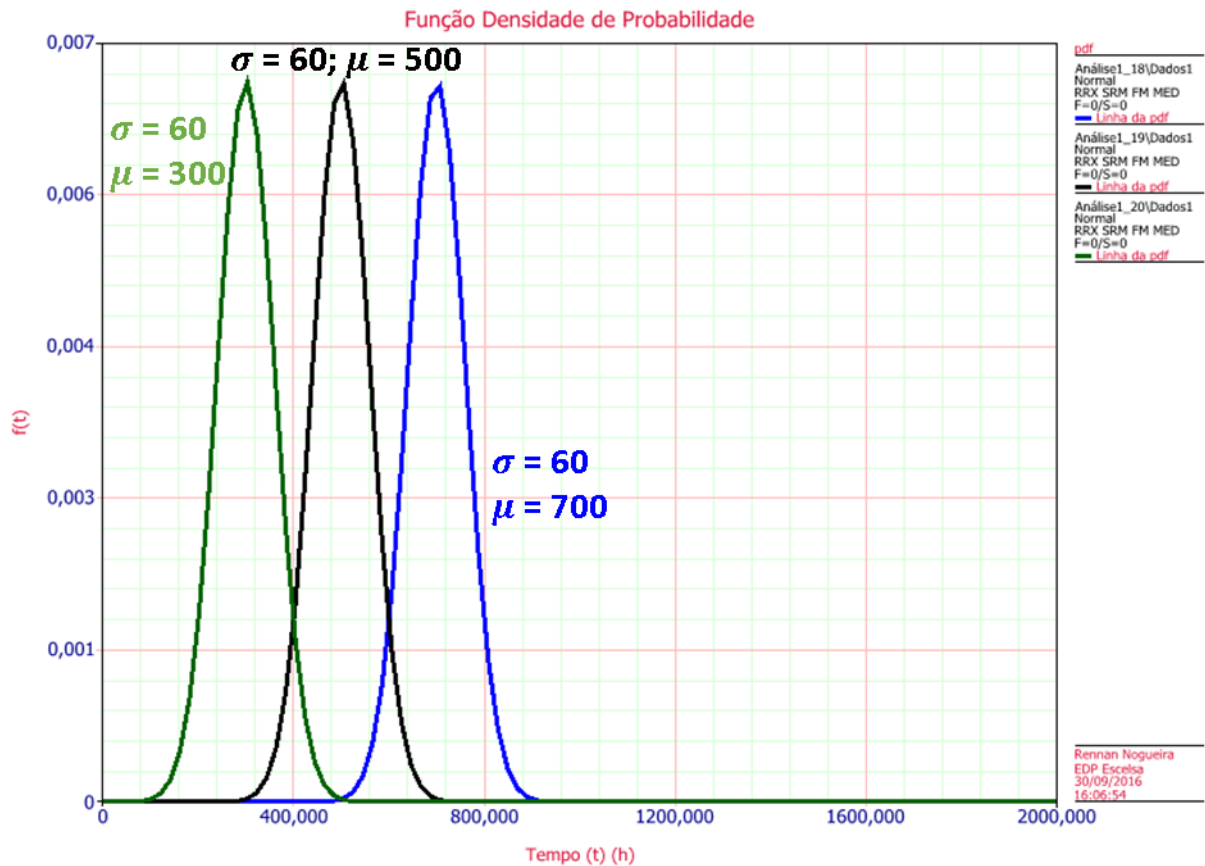
$\mu$  é a média dos tempos até falha, correspondente ao parâmetro de escala.

Nas figuras 9 e 10, onde são apresentadas de forma gráfica algumas das pdf's da Distribuição Normal, é possível perceber a influência dos parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$ .

Figura 8 - Influência do parâmetro  $\sigma$  na pdf da distribuição normal



Fonte: Elaboração do autor

Figura 9 - Influência do parâmetro  $\mu$  na pdf da distribuição normal

Fonte: Elaboração do autor

É possível observar também que a curva normal tem, por característica, baixos índices de falha na juventude e na velhice, ou seja, as falhas normalmente ocorrem no período de vida útil. E ainda, quanto menor o valor do desvio padrão,  $\sigma$ , maior o período inicial e o período final de operação com poucas falhas.

Sua aplicabilidade, apesar de ser extensa em análises estatísticas, em Engenharia de Confiabilidade é normalmente restrita a componentes, equipamentos ou sistemas eletrônicos e mecânicos simples.

### 3.2.2 Distribuição Lognormal

A Distribuição Lognormal é comumente utilizada na análise geral de confiabilidade, em ciclos até a falha, em fadiga, em resistência de material e nos projetos probabilísticos com cargas variáveis. A pdf da Distribuição Lognormal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu'}{\sigma'}\right)^2} \quad (17)$$

Onde:

$\sigma'$  é o desvio padrão, correspondente ao parâmetro de forma;

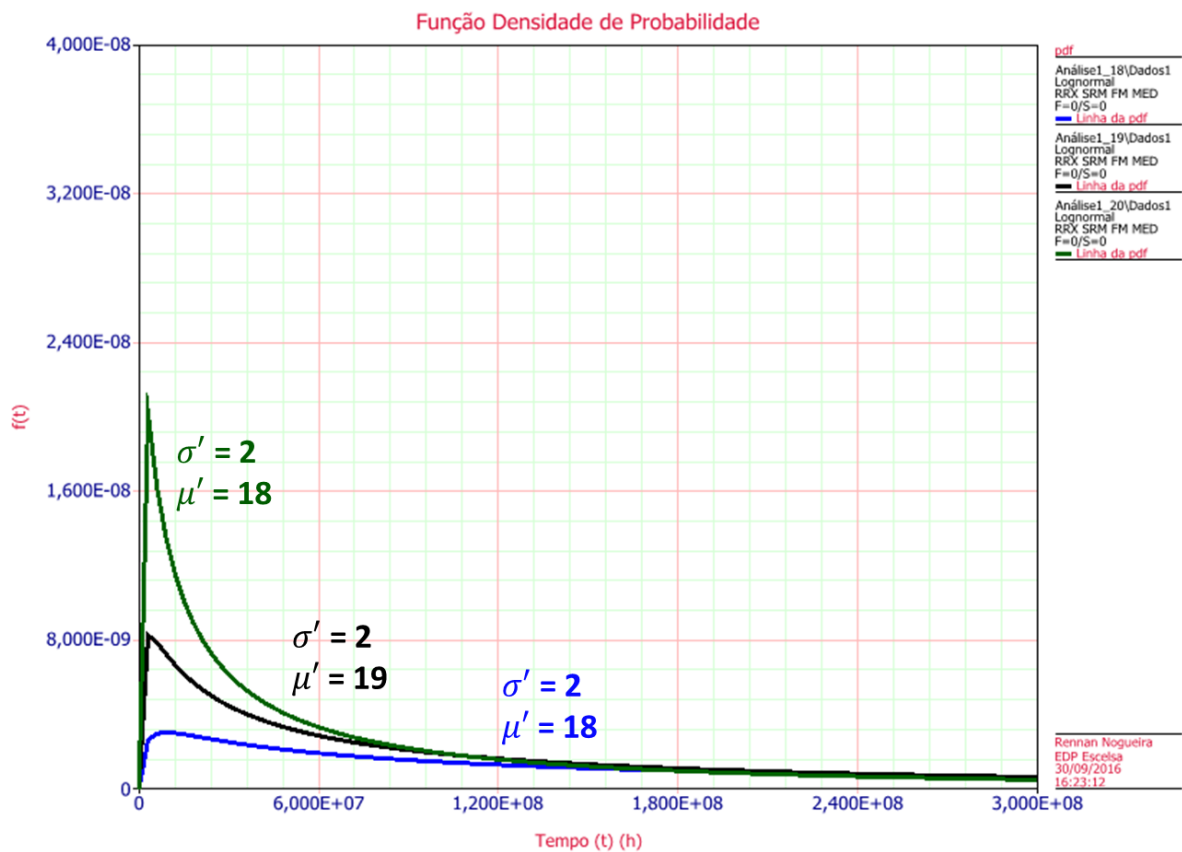
$\mu'$  é a média dos tempos até falha, correspondente ao parâmetro de escala.

Comparando com a pdf da Distribuição Normal exposta na Equação 16, percebe-se que essas são iguais, a menos do fator  $t$  existente no denominador da pdf da Distribuição Lognormal.

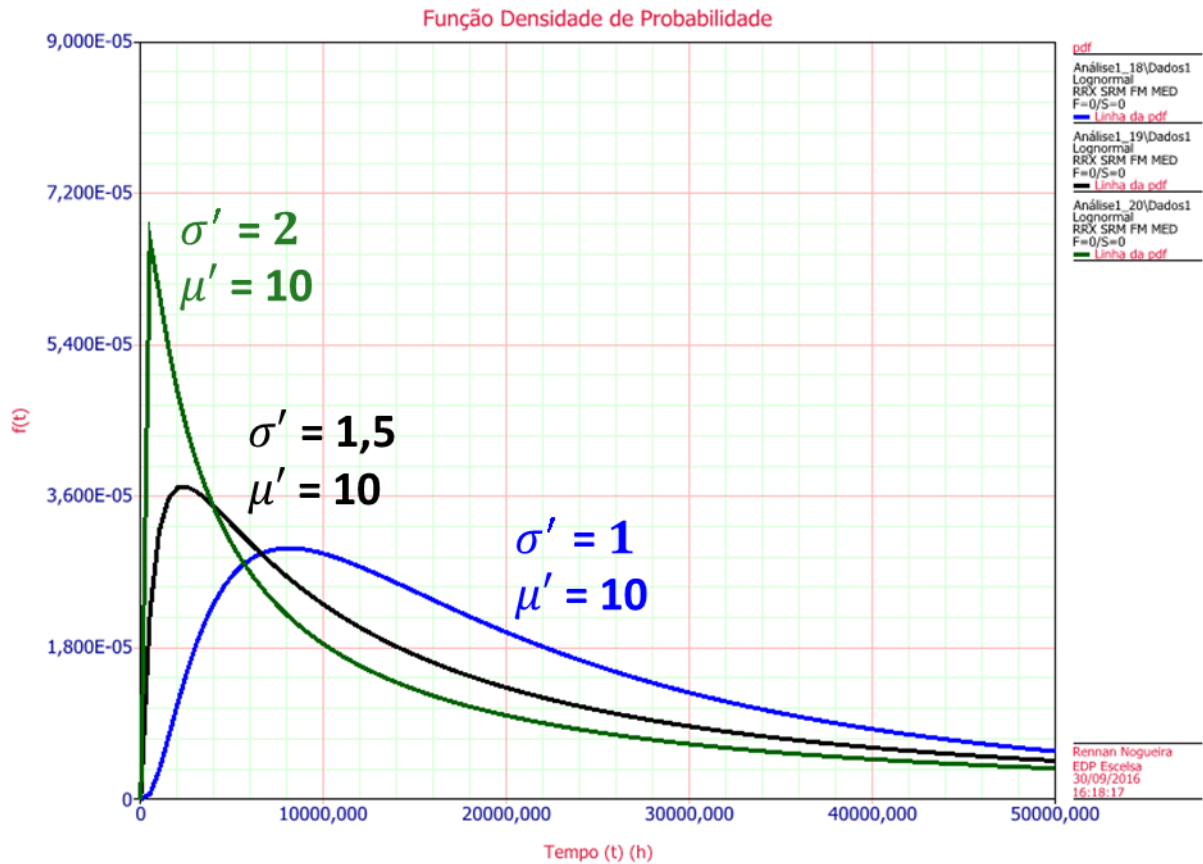
Essa relação significa que dados provenientes de uma distribuição lognormal podem ser analisados segundo uma distribuição normal, se considerarmos o logaritmo dos dados ao invés dos valores originais. Em consequência, quando os logaritmos naturais dos tempos até a falha são normalmente distribuídos, dizemos que os dados seguem uma distribuição lognormal.

Nas Figuras 10 e na Figura 11, onde são apresentadas de forma gráfica algumas das pdf's da distribuição lognormal, é possível perceber a influência dos parâmetros  $\sigma'$  e  $\mu'$ .

Figura 10 - Influência do parâmetro  $\sigma'$  na pdf da distribuição lognormal



Fonte: Elaboração do autor

Figura 11 - Influência do parâmetro  $\mu'$  na pdf da distribuição lognormal

Fonte: Elaboração do autor

Analisando a Figura 8 e a Figura 10, é possível perceber que enquanto a distribuição normal é simétrica com relação ao tempo, a distribuição lognormal é assimétrica e deslocada para a esquerda, permitindo um ajuste melhor em comportamentos assimétricos de dados de vida.

### 3.2.3 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial se caracteriza por uma função taxa de falha constante, pois essa é um dos parâmetros da função, sendo a única distribuição absolutamente contínua com essa propriedade. A função densidade de probabilidade da distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (18)$$

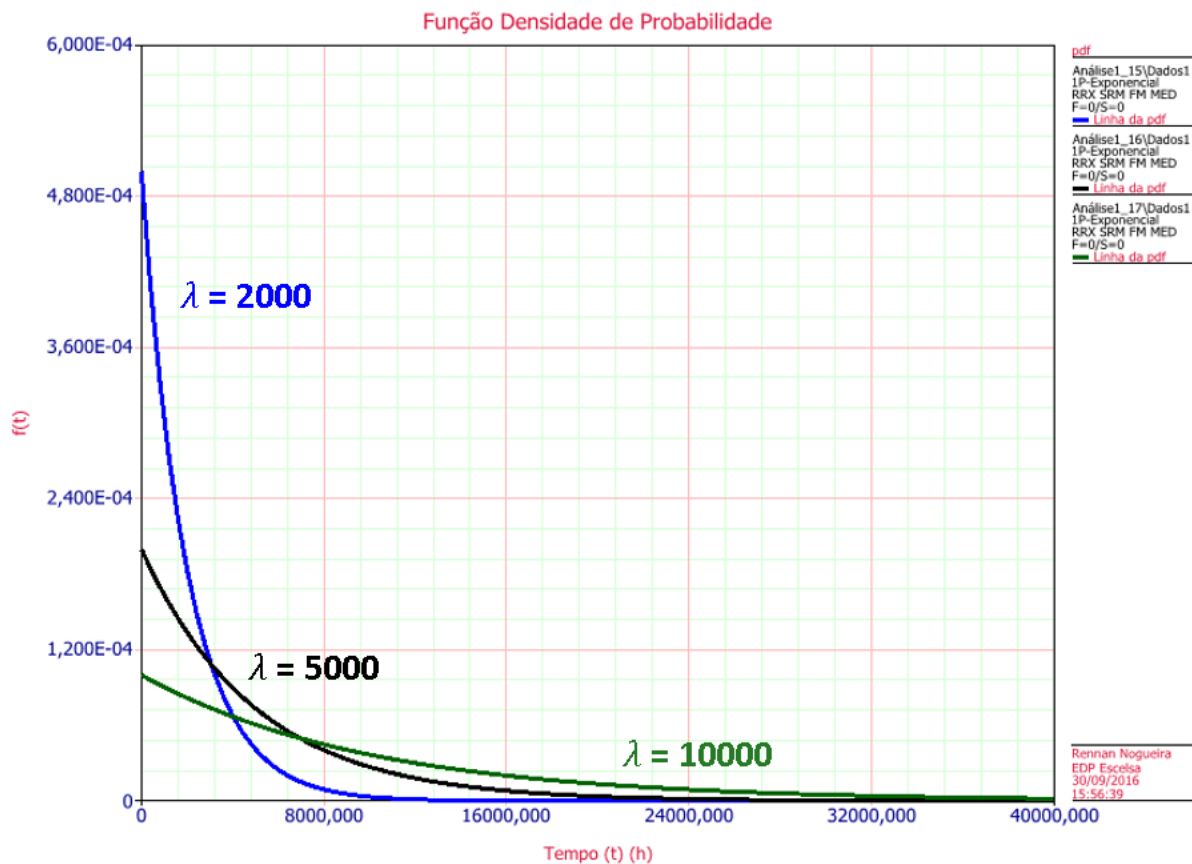
Onde:

$\lambda$  - taxa de falha, correspondente ao parâmetro de escala;

$\gamma$  - o parâmetro de localização.

Graficamente, sua pdf tem as seguintes formas, para diferentes valores de  $\lambda$  e com o parâmetro de localização nulo.

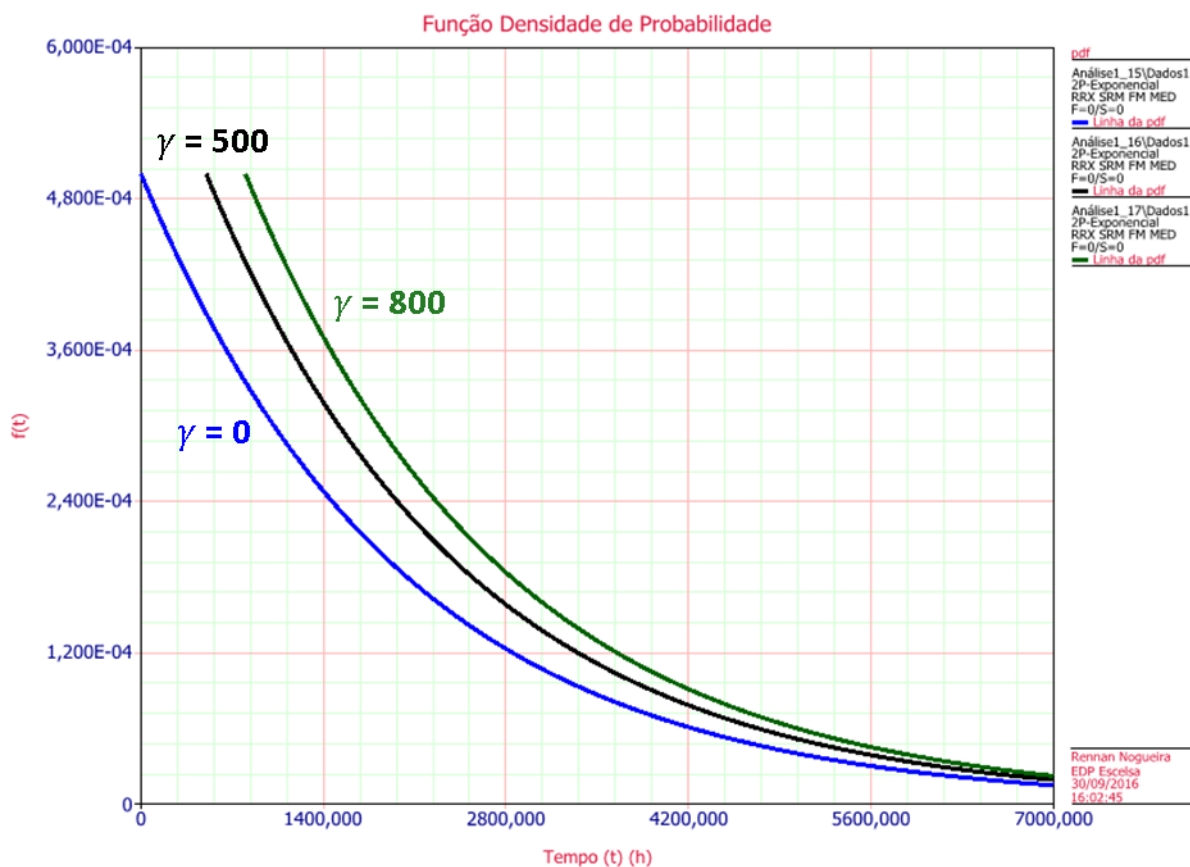
Figura 12 - Influência do parâmetro  $\lambda$  na pdf da distribuição exponencial



Fonte: Elaboração do autor

A influência do parâmetro  $\gamma$  pode ser vista na Figura 13, onde são obtidas várias pdf's para diferentes valores de  $\gamma$  para a taxa de falha igual a dois mil.



Figura 13 - Influência do parâmetro  $\gamma$  na pdf da distribuição exponencial

Fonte: Elaboração do autor

A distribuição exponencial é considerada uma das mais simples em termos matemáticos e por isso uma das mais utilizadas. Entretanto, devido a essa simplicidade, a sua aplicabilidade é restrita a aplicações mais simples e os devidos cuidados devem ser tomados com as análises utilizando essa distribuição. Um exemplo de aplicação adequada para desta distribuição é para o tempo de vida de óleos isolantes e dielétricos.

### 3.2.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull foi proposta originalmente por W. Weibull em 1954, ou seja, duzentos e vinte e quatro anos depois da distribuição normal, em estudos relacionados ao tempo de falha devido a fadiga de metais. Ela é frequentemente usada para descrever o tempo de vida de produtos industriais.

A sua popularidade em aplicações práticas deve-se ao fato dela apresentar uma grande variedade de formas, todas com uma propriedade básica: a sua função

de taxa de falha é monótona, isto é, ela é estritamente crescente, estritamente decrescente ou constante.

Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (19)$$

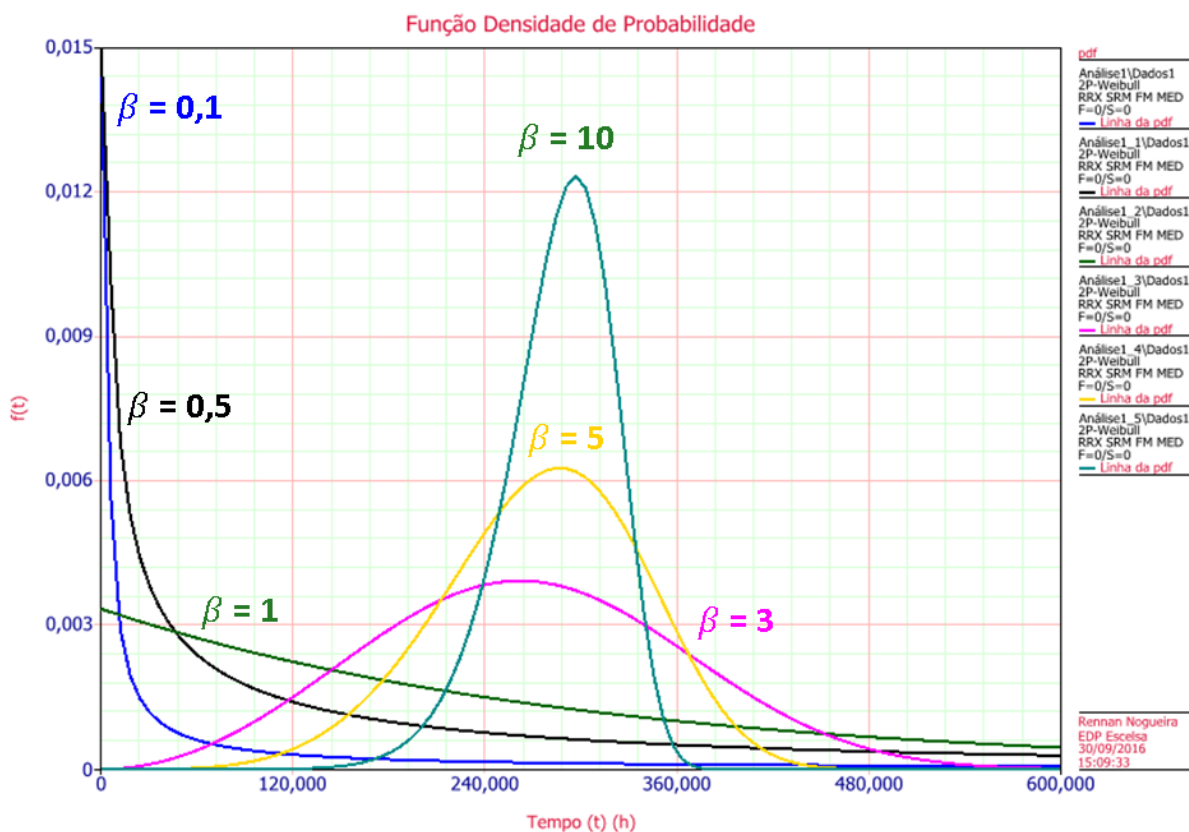
Onde:

- $\beta$  - o parâmetro de forma;
- $\eta$  - o parâmetro de escala;
- $\gamma$  - o parâmetro de localização.

Cada um desses parâmetros tem uma influência específica e independente no comportamento da distribuição de Weibull. Nas seções a seguir, é mostrado como cada um desses parâmetros influencia nas funções:

- **$\beta$  - Parâmetro de forma**

A influência do parâmetro  $\beta$  na forma da pdf é vista na Figura 14. Nesta figura, são mostradas seis pdf's diferentes em que os parâmetros  $\eta$  e  $\gamma$  são mantidos constantes em trezentos e zero, respectivamente, e os valores de  $\beta$  são variados:

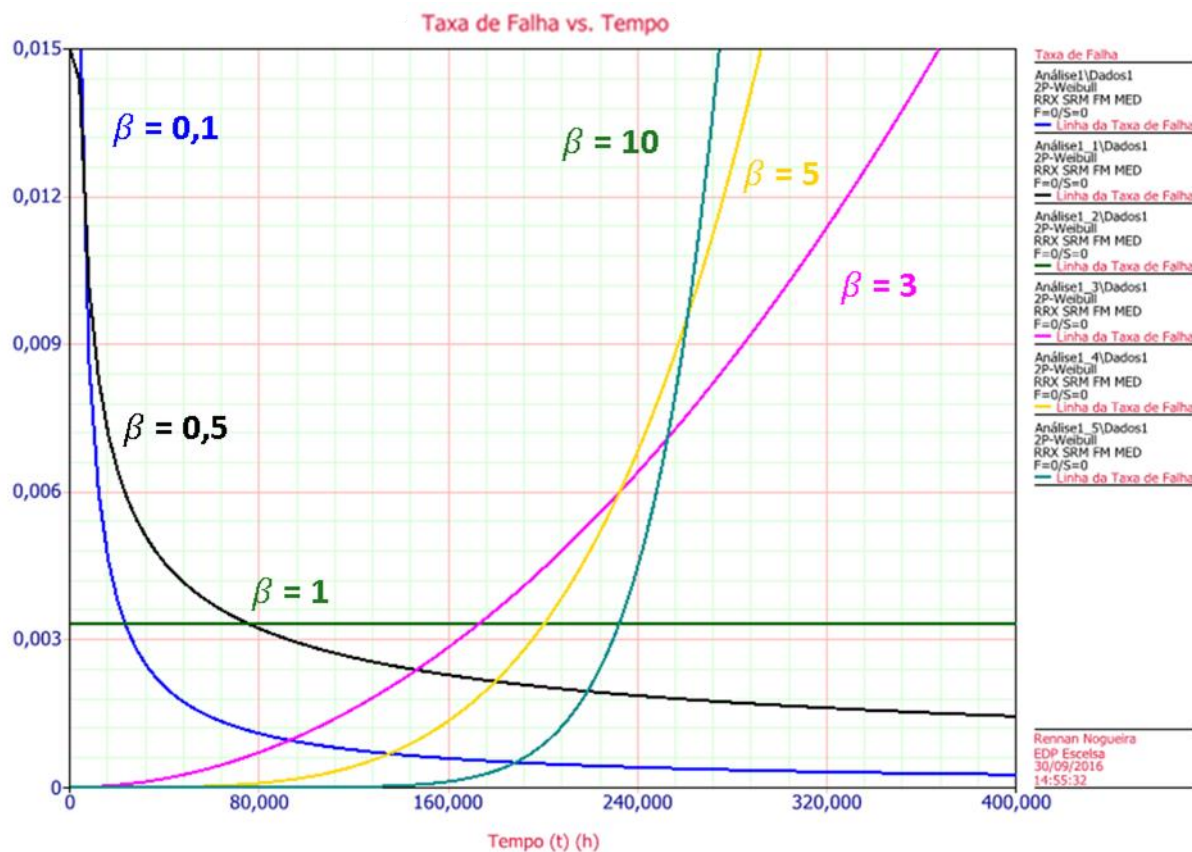
Figura 14 - Influência do parâmetro  $\beta$  na pdf da distribuição Weibull

Fonte: Elaboração do autor

Além disso, uma característica particular desse parâmetro é que o mesmo indica o comportamento da função da taxa de falha  $\lambda(t)$  da seguinte maneira:

- Para  $\beta < 1$ , a função taxa de falha é decrescente e, quanto menor é este, mais rapidamente a função decresce.
- Para  $\beta = 1$ , a função taxa de falha é constante.
- Para  $\beta > 1$ , a função taxa de falha é crescente e, quanto maior é este, mais rapidamente a função cresce,.

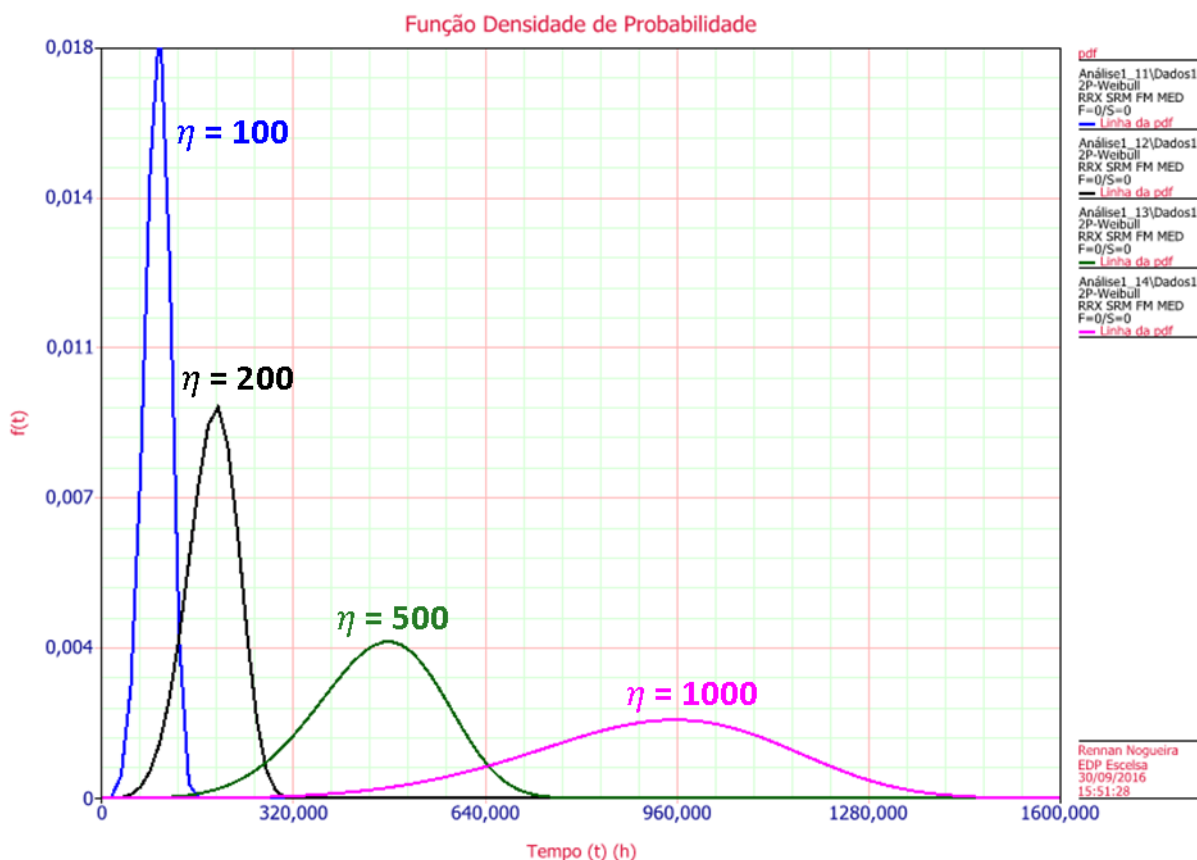
Essas constatações podem ser vistas graficamente na Figura 15, onde são representadas as curvas de taxa de falha correspondentes as pdf's da Figura 14:

Figura 15 - Influência do parâmetro  $\beta$  na taxa de falha da distribuição Weibull

Fonte: Elaboração do autor

- $\eta$  - Parâmetro de escala

Também conhecido como vida característica, corresponde ao intervalo de tempo a partir de  $T_0$  no qual ocorrem aproximadamente 63,2% das falhas. O parâmetro  $\eta$  é definido na mesma unidade dos dados de tempo até a falha (32). A Figura 16 ilustra a influência desse parâmetro na pdf da distribuição de Weibull, quando se mantem os outros parâmetros constantes:

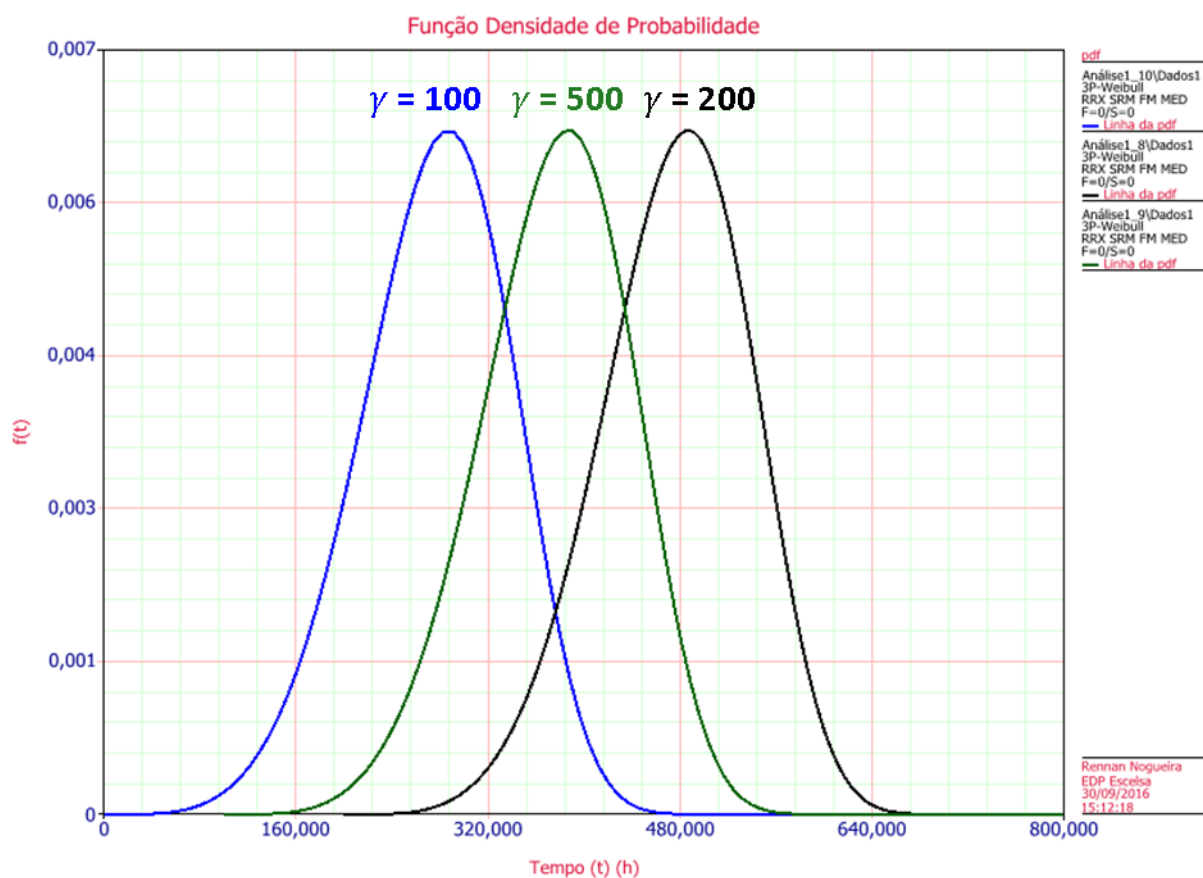
Figura 16 - Influência do parâmetro  $\eta$  na pdf da distribuição Weibull

Fonte: Elaboração do autor

- **$\gamma$  - Parâmetro de posição**

Conhecido como parâmetro da vida mínima ou vida intrínseca. Refere-se ao tempo livre de falhas. Quando utilizado, gera um deslocamento para a direita no gráfico da distribuição. Para medidores de energia elétrica, é impossível definir um tempo livre de falhas, portanto esse parâmetro é desconsiderado, nesse caso a distribuição Weibull se reduz à sua forma de 2 parâmetros.

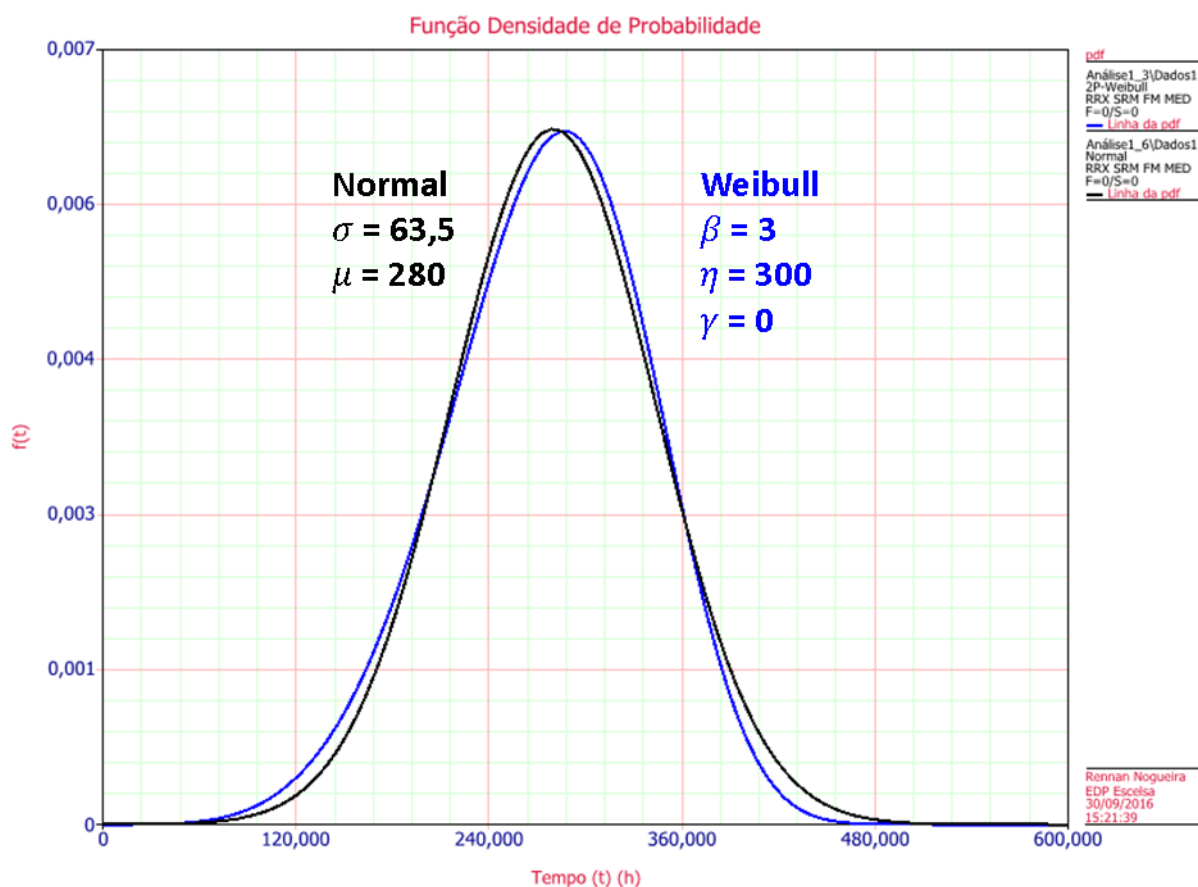
A Figura 17 ilustra, de forma gráfica, essa característica. Mantendo os outros parâmetros constantes e aumentando o parâmetro de posição, a curva vai sendo deslocada para a direita.

Figura 17 - Influência do parâmetro  $\gamma$  na pdf da distribuição Weibull

Após a análise individual dos parâmetros da distribuição Weibull, é visto, em síntese, que sua pdf pode ter diferentes formatos e conseqüentemente se aproximar de outras distribuições, devido a essa versatilidade a Weibull é uma proposta geral para análise de confiabilidade.

Um exemplo dessa versatilidade relativa à semelhança com outras distribuições a partir da variação dos parâmetros da distribuição de Weibull exemplificada na Figura 18:

Figura 18 - Comparação entre as pdf's das distribuições normal e Weibull



Fonte: Elaboração do autor

Nessa figura, foram comparadas as pdf's de uma distribuição Weibull e de uma normal, entretanto, com os ajustes dos parâmetros feitos de forma correta, é possível a aproximação entre a distribuição de Weibull e outras, como a exponencial.

## **4 MODELO DE ESTRESSE-VIDA E ENSAIOS DE VIDA ACELERADA**

Para se obter informações a respeito do comportamento de fadiga de materiais de engenharia é necessário realizar testes de tempo de vida, em que a variável de interesse é o tempo até a falha (33).

Entretanto, para alguns equipamentos esse tempo costuma ser muito longo, tornando inviável a realização de tais testes. É neste contexto que se insere os testes de vida acelerada que necessitam de ser analisados por meio de modelos estatísticos adequados, os modelos de Estresse-Vida.

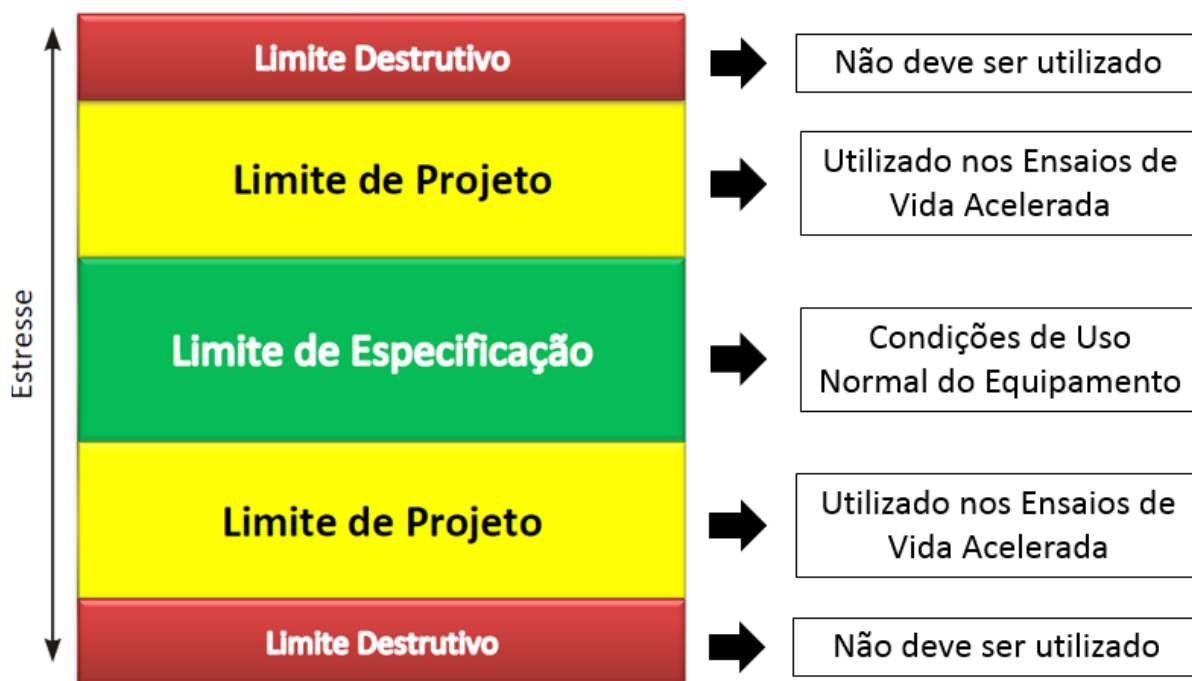
O modelo Estresse-Vida quantifica a maneira como a distribuição de vida de um equipamento varia para diferentes níveis de estresse. A combinação de uma distribuição de vida e um modelo estresse-vida com os dados de tempo até falhar obtidos em diferentes níveis de estresse fornecerá uma estimativa das características em condições normais de uso. Essa estimativa pode ser tão precisa quanto se queira e é definida a partir do tipo de aplicação e dos recursos disponíveis.

Em outras palavras, o modelo Estresse-Vida utiliza o modelo Distribuição de Vida, e antecipa o tempo das falhas por meio de estímulos de estresse do produto em ensaios específicos. Estes estímulos podem ser por meio de temperatura, umidade, vibração, tensão, ou com a combinação desses estímulos. Cada produto possui um estímulo que o fará perder suas propriedades mais rápido; conhecer estes estímulos é fundamental, pois evita perda de tempo com ensaios aleatórios (16).

Um aspecto crucial na definição dos estímulos são os limites de estresse a que o produto pode ser submetido, já que ultrapassá-los vai em desencontro com a teoria dos ensaios de vida acelerada. Isso porque, uma vez que as falhas que aparecerão não irão representar a realidade de campo. A Figura 19 esclarece os limites comuns aos produtos susceptíveis a esses ensaios.



Figura 19 - Diagrama dos limites de operação de equipamentos



Fonte: Elaboração do autor

Dessa forma, os níveis de estresse devem ser altos o suficiente para gerar uma quantidade mínima de falhas em um tempo reduzido, porém não elevados a ponto de exceder os limites de projeto do produto e nem introduzir modos de falha que jamais ocorreriam sob condições de uso normal.

Portanto, é imprescindível conhecer os limites de especificação do produto e, mesmo que empiricamente, também, os limites de projeto; pois a projeção desse teste ao acaso pode ser considerada como perda de dinheiro, tempo e recurso humano.

#### 4.1 Ensaios de Estresse-Vida

Entre os métodos de ensaio de Estresse-Vida usuais, estão os testes de vida acelerada, que podem ser qualitativos ou quantitativos. Dentre os ensaios quantitativos, que são o alvo desse trabalho, está o teste de uso contínuo, que representa uma aceleração em relação ao uso normal e também o ensaio acelerado de vida. A seguir, há uma introdução desses testes usuais.

##### 4.1.1 Testes de Vida Acelerada Qualitativos

Os ensaios qualitativos se caracterizam como aqueles que produzem informações de falhas ou modos de falha. Essa classe de ensaios fornece um resultado que informa se o material atingiu ou não um desempenho pré-determinado

ou vida pré-estabelecida (34). Dentro dos testes qualitativos são encontrados inúmeros tipos de ensaios, cada qual com nomes específicos que variam de acordo com o objetivo, como é o caso do *Burn-In*, do Teste Limite, *Shake & Bake Tests*, Environmental Stress Screening, HALT, dentre outros.

Os testes qualitativos são projetados com pequenas amostras, pois cada item da amostra é submetido a condições bastante rigorosas e deve ser descartado após o teste. Com a avaliação pós-teste, é possível saber se o item sobreviveu ao teste, ou seja, se passou no teste.

O valor desse tipo de teste se dá no aspecto que muitos modos, ou tipos, de falha são revelados e podem ser pesquisados e corrigidos. Entretanto, a deficiência desse tipo de teste é que ele não responde a duas questões essenciais: Qual a confiabilidade do produto e se os modos de falha observados nos testes são os mesmos que ocorrerão durante a vida de um produto sob uma condição normal de uso.

Por isso, os dados de testes qualitativos não são usados para realizar previsões da confiabilidade do produto e para essa aplicação usa-se os testes de vida acelerados quantitativos.

#### **4.1.2 Testes de Vida Acelerados Quantitativos**

Os Testes Quantitativos de Vida Acelerada, diferentemente dos testes qualitativos, são realizados com o intuito de fornecer informações de confiabilidade sobre um produto, componente ou sistema através de dados numéricos obtidos durante os testes acelerados.

Utilizam-se ensaios quantitativos para se quantificar a vida característica de um produto, ou equipamento, quando há necessidade de que testes sejam realizados em um período de tempo menor do que o desejável para a duração do produto.

Por exemplo, um novo automóvel será lançado no mercado e se pretende uma garantia de 4 anos para esse veículo, no entanto, o ciclo de desenvolvimento do carro tem previsão de apenas 12 meses. Nesse caso, que não se dispõe de tempo para fazer os testes de vida sob condições normais de uso, é necessário aplicar uma metodologia quantitativa para estimativa de vida do produto.

Os ensaios de envelhecimento acelerado quantitativos podem ser executados através da aceleração da taxa de uso, ou pela aceleração do estresse. No caso de

equipamento que não opera continuamente, a aceleração pode ser obtida pela operação contínua. A isto se chama aceleração da taxa de uso (ABNT,2012).

#### **4.1.2.1 Ensaios de Aceleração de Uso Contínuo**

O tipo mais simples e comum de ensaio acelerado quantitativo é o de aceleração pelo uso contínuo, também chamado de aceleração pela taxa de uso. Esse ensaio consiste em submeter um equipamento que normalmente trabalha algumas horas por dia a um regime contínuo de funcionamento. Este tipo tem aplicação típica para produtos de uso doméstico ou para alguns produtos industriais em que a taxa de utilização é baixa (34).

Um exemplo com um equipamento de nosso cotidiano são os testes realizados com as portas de geladeira. Estimando que a porta seja aberta e fechada, em média, 40 vezes por dia, e no ensaio de aceleração da taxa de uso uma máquina consiga operar a porta 8.000 vezes por dia, temos um fator de aceleração de duzentas vezes e as falhas aparecerão rapidamente.

Quanto menor o tempo de uso normal do componente, maior o fator de redução do tempo total de teste. Nesse caso, a limitação ocorre com produtos de uso intenso em que não é possível uma redução significativa de tempo (35), que é o caso dos medidores de energia elétrica, que já possuem operação contínua e, por isso, não há possibilidade de aceleração da taxa de uso e esse tipo de teste não se aplica.

#### **4.1.2.2 Ensaios de Vida Acelerada**

Nos ensaios de vida acelerada, os equipamentos são submetidos a diferentes níveis de estresse de modo, assim como no ensaio de aceleração de uso contínuo, a encurtar o tempo até a falha. O objetivo é quantificar o tempo do evento da falha para os diferentes níveis de stress e, a partir desse conjunto de dados, poder extrapolar esse comportamento para o nível de operação normal.

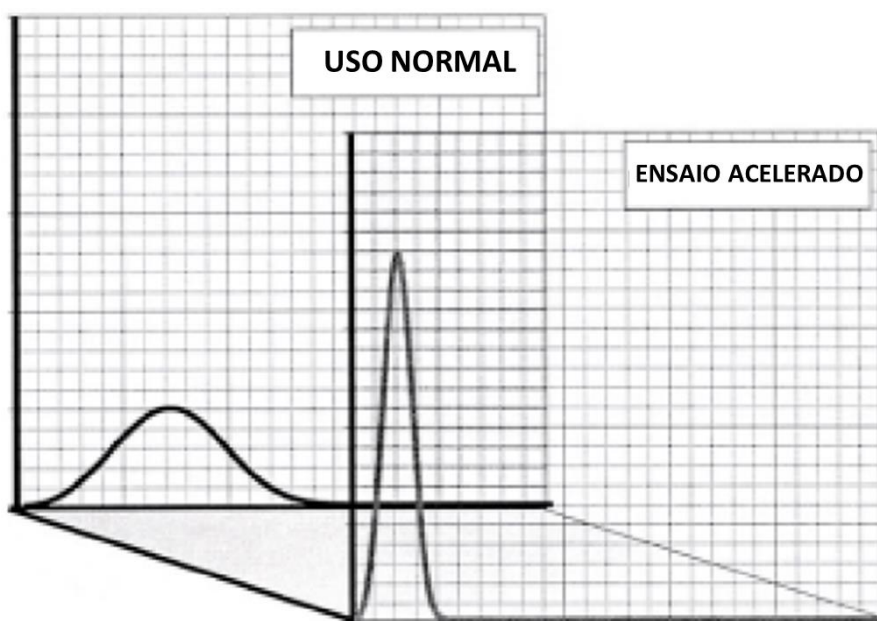
Os ensaios acelerados de vida requerem um entendimento antecipado do mecanismo de falha e o conhecimento da magnitude da aceleração deste mecanismo de falha, como função da solicitação acelerada. Assim, é fundamental que se conheça o modelo que relaciona a o tempo de vida nas condições aceleradas com o tempo nas condições normais de operação do sistema.

Esses modelos matemáticos consideram isoladamente a influência de cada tipo de estresse aplicado ao equipamento, tornando possível a construção de várias pdf's

para vários níveis de estresse  $e$ , a partir das relações matemáticas do modelo, extrapolá-las para a condição de uso.

Com isso feito, é possível obter o fator de aceleração em relação à condição normal de uso. Qualquer que seja o modelo escolhido, as pdf's desenvolvidas devem apresentar diferença apenas no parâmetro de escala, que na distribuição de Weibull é o parâmetro de vida característica  $\eta$ , mas, jamais no seu parâmetro de forma, que na distribuição de Weibull é o parâmetro  $\beta$ . A figura a seguir ilustra essa relação:

Figura 20 - Representação da pdf para uso normal e para ensaio acelerado



Fonte: (SASSERON & ABARCKELI, 2005, p. 47) (34)

É de se ressaltar que para os ensaios de vida acelerada, devido às características do ensaio, só é possível a escolha de três modelos dentre os modelos apresentados no capítulo 4: exponencial, Weibull e lognormal. Apesar do primeiro ser raramente utilizado e possuir aplicações muito restritas, a norma ABNT 16078 realiza todas as explicações com base no modelo de Weibull, ignorando as demais distribuições.

Nesse trabalho, apesar da distribuição de Weibull se adequar à maioria dos casos, os outros modelos que relacionam a vida nas condições aceleradas com as condições de uso padrão não serão desprezados e, além de já terem sido explanados no trabalho, as suas aplicabilidades serão avaliadas no estabelecimento da metodologia para ensaios de vida acelerada dos medidores eletrônicos da EDP Escelsa.

## 4.2 Modelos de Estresse-Vida

Primeiramente, deve ser selecionado um modelo matemático que descreva de maneira adequada a distribuição de probabilidade de falhas para em todos os níveis de estresse diferentes. Essa escolha depende da variável ou das variáveis de estresse aplicada aos ensaios de vida acelerada. O modelo define o parâmetro de escala como uma função do estresse aplicado dada por:

$$L(V)$$

Onde  $L(V)$  é a função vida característica ou parâmetro de escala, que representa a dispersão de falhas ao longo do tempo, e  $V$  é o nível de estresse.

Outra definição importante é o fator de aceleração, abreviado do inglês como AF. Esse fator é utilizado para definir a relação da vida característica nas condições normais de uso e nas condições de estresse, bem como a relação da vida característica entre condições de estresse intermediários (3). A definição do fator AF é dado por:

$$AF = \frac{L(Uso)}{L(Acelerada)} \quad (20)$$

A teoria da confiabilidade em ensaios acelerados indica que existem dois tipos de curva  $L(V)$  que podem ser utilizadas para as principais variáveis de estresse desse tipo de ensaio, como temperatura, umidade, pressão, dentre outras. As duas curvas em questão são a exponencial e a curva de potência. Também é possível fazer uma combinação destes tipos de curvas para múltiplas variáveis de estresse.

A norma brasileira ABNT 16078 especifica a aceleração por duas variáveis de estresse simultâneas e em ambas são usadas as curvas exponenciais, e por isso essas serão as de maior foco nesse trabalho. A seguir, os modelos descritos na norma são expostos.

### 4.2.1 Modelo de Aceleração de Temperatura Arrhenius

Nos testes de vida acelerada, o aumento da temperatura é o fator de stress mais utilizado com componentes eletrônicos, devido à conhecida sensibilidade dos componentes eletrônicos a variações de temperatura. Para modelar esse comportamento, a norma descreve a dependência da temperatura e do tempo necessário para um evento ocorrer pelo modelo de aceleração de temperatura de Arrhenius.

Esse modelo baseia-se na lei de Arrhenius para a velocidade de reações químicas, estabelecida pelo físico e químico sueco Svandte Arrhenius em 1887. O modelo supõe que os tempos até a falha de um componente como sendo proporcionais ao inverso da taxa de reação, definido por:

$$L = A^{-e^{\frac{E_a}{kT}}} \quad (21)$$

Onde:

$L$  - distribuição de vida do componente;

$A$  - constante não térmica característica da reação e das condições que ela ocorre;

$E_a$  - energia de ativação, expressa em volts (V);

$k$  - constante de Boltzmann ( $8,617 \times 10^{-5}$  eV/K);

$T$  - temperatura na reação, expressa em graus Kelvin (K).

Assim sendo, a relação entre a vida do componente em condições de uso,  $L_u$ , e de condições aceleradas,  $L_s$ , é dada por:

$$\frac{L_u}{L_s} = \frac{e^{\frac{E_a}{kT_u}}}{e^{\frac{E_a}{kT_s}}} \quad (22)$$

Entretanto, da Equação 20, tem-se que a relação entre a vida do componente em condições normais e aceleradas é a definição de fator de aceleração. Logo, o fator de aceleração por fatores térmicos e de umidade pode ser definido como:

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (23)$$

Isso posto, é de se observar também que na Equação 23, a única variável não conhecida é a energia de ativação. Caso tenha-se o conhecimento prévio desse valor, através de normas ou ensaios anteriores, a utilização dessa equação se torna o método mais acessível para a obtenção do fator de aceleração térmico.

#### 4.2.2 Modelo de Aceleração de Temperatura e Umidade de Peck

Além da temperatura, a umidade apresenta uma grande influência na vida de componentes eletrônicos, especialmente em componentes que possuem encapsulamento plástico (36). E os mecanismos de falha que são comumente

incentivados pela umidade são corrosão, corrosão eletrolítica, e migração do metal (37).

Em virtude dessa influência, os ensaios são conduzidos sob os efeitos simultâneos da variação de temperatura e da umidade relativa. Para esse tipo de ensaio, aplica-se o modelo de Peck de temperatura e umidade, que segue:

$$L = A(UR)^{-n} e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (24)$$

Onde:

$L$  - distribuição de vida do componente;

$A$  - constante não térmica;

$UR$  - umidade relativa (%);

$n$  - uma constante;

$E_a/kT$  - expoente de Arrhenius.

Assim sendo, a relação entre a vida do componente em condições de uso,  $L_u$ , e de condições aceleradas,  $L_s$ , é dada por:

$$\frac{L_u}{L_s} = \frac{A(UR_u)^{-n} e^{\frac{E_a}{kT_u}}}{A(UR_s)^{-n} e^{\frac{E_a}{kT_s}}} \quad (25)$$

$$\frac{L_u}{L_s} = \left( \frac{UR_u}{UR_s} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (26)$$

Entretanto, da Equação 20, tem-se que a relação entre a vida do componente em condições normais e aceleradas é a definição de fator de aceleração. Logo, o fator de aceleração por fatores térmicos e de umidade pode ser definido como:

$$AF_p = \left( \frac{UR_u}{UR_s} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (27)$$

Observando a Equação 27, pode-se concluir que esta é composta por duas parcelas bem distintas. A primeira é relativa à contribuição da umidade no fator de aceleração, representada pelo termo:  $\left( \frac{UR_u}{UR_s} \right)^{-n}$ . A segunda é relativa à influência da temperatura, modelada pela lei de Arrhenius e representada pelo termo:  $e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)}$ .

### **4.3 Metodologia para Ensaio de Vida Acelerada**

Neste subcapítulo, será desenvolvida a metodologia para ensaios de vida acelerada dos medidores eletrônicos de baixa tensão da EDP Escelsa. Essa metodologia atenderá os requisitos da norma brasileira ABNT NBR 16078:2012 e será aplicada aos ensaios realizados pela distribuidora a partir da publicação desse trabalho.

Nessa mesma seção serão obtidas as condições climáticas aplicáveis para o estado do Espírito Santo e esses dados serão aplicados aos modelos para os cálculos subsequentes. Ademais, todas as outras exigências da norma em questão serão seguidas, e se necessário, ressalvas serão feitas quanto a sua aplicabilidade.

Essa Norma da ABNT especifica um método para estimar as características de vida de ativos através de ensaios de envelhecimento acelerado, entretanto, limita-se a indicar os resultados, sem qualquer definição de percentual de falhas aceitável nem mesmo qualquer implicação dos resultados dos ensaios na aceitação de lotes.

A aplicabilidade desse documento é aos medidores de energia elétrica e dispositivos conectados aos medidores (por exemplo, comunicação, controle de carga etc.). O método determinado na Norma pode ser usado para estimar, dentro de determinado intervalo de confiança, as características de vida de equipamentos antes e durante sua produção em série.

A aceleração é obtida pela aplicação de temperatura e umidade elevadas. O método também leva em conta a aplicação de tensão e de corrente. Outros fatores, como vibração, poeira, afundamentos de tensão e interrupções curtas, descargas eletrostáticas, transientes rápidos, surtos etc. - embora possam afetar as características de vida do medidor - não são considerados. (20)

A estrutura utilizada nesse tópico será baseada na apresentação e análise dos conceitos estabelecidos pela Norma, e em seguida, a aplicação desses conceitos à realidade da EDP Escelsa. Além dos conceitos apresentados a seguir, serão utilizados o conteúdo apresentado nos capítulos 2 e 3.

#### **4.3.1 Definição da Amostra**

Os ensaios de vida acelerada são caracterizados como destrutivos, já que inutilizam os equipamentos submetidos ao processo, mesmo que esses não venham a falhar no final dos ensaios. Por isso, objetivando a viabilidade econômica e



operacional, o primeiro passo para o estabelecimento da metodologia a ser implantada é a definição da amostra dos lotes a serem adquiridos.

Nesse aspecto, o texto da Norma é bem claro: para a avaliação de medidores de energia elétrica, recomenda-se que sejam tomados 30 medidores como amostra para a execução do ensaio, não cabendo qualquer interpretação. Por isso, essa será a quantidade utilizada e escolhida de forma aleatória em cada um dos ensaios que a serem realizados.

#### **4.3.2 Definição das Características de Vida do Medidor**

Após realizada a seleção da amostra, é fundamental que se defina as características de vida do produto que têm que ser verificadas e com qual nível de confiança. O texto da Norma diz: para efeitos de aplicação do ensaio acelerado deve ser utilizado nível típico de confiança de 50 %.

Aqui vale uma ressalva. Conforme dito anteriormente, a Norma Brasileira, em grande parte, é uma tradução da norma internacional IEC 60300-3- 5:2001. Entretanto em alguns pontos da Norma da ABNT o termo nível de confiança não é usado de maneira adequada.

Nível de confiança é a probabilidade de que o resultado apresentado esteja correto. O que a norma pretende dizer com esse termo está relacionado aos limites de confiança. Sendo assim, o que ela quer dizer com nível de confiança 50% é que o valor calculado será um valor médio ou o 50º percentil, que é o valor mais provável de acontecer.

Além do mais, a norma também estabelece que salvo especificado em contrário, devem ser consideradas as seguintes características de vida do produto e seus respectivos valores:

- percentual de falhas: 5 %;
- tempo para atingir o percentual de falhas: 10 anos.

Esses valores estão fora da realidade brasileira, principalmente pelo fato do tempo regulatório de amortização dos medidores eletrônicos ser de treze anos, como especificado pela ANEEL, no Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico.

A principal divergência com a realidade está no tempo para atingir o percentual de falhas, pois o interesse principal nos ensaios de confiabilidade desses ativos deve ser o percentual de falhas admissível ao fim do período regulatório de 13 anos, já que

a falha desses equipamentos após esse período não acarreta em prejuízo financeiro à distribuidora.

Para os ensaios da EDP Escelsa, após discussões a respeito do percentual de falhas admissível ao final do período regulatório, chegou-se ao valor de que o percentual admissível será de 10%, ao final do décimo terceiro ano de operação.

#### **4.3.3 Definição do Método de Ensaio para Detectar Falhas.**

Para os ensaios de vida acelerada nos medidores de instalações de baixa tensão, os seguintes tipos de falhas devem ser considerados:

- A queima de algum componente do medidor;
- O medidor parar de medir;
- O medidor parar de registrar ou registrar incorretamente tanto no display quanto na memória de massa, quando o medidor tiver esse recurso;
- O medidor medir incorretamente, com percentual de erro além do estabelecido pela sua classe;
- O medidor parar de mostrar o registro;

Para as falhas do tipo: o medidor queimar, o medidor parar de medir e o medidor medir incorretamente, o seguinte ensaio de exatidão deve ser aplicado aos medidores para verificação de ocorrência das falhas:

- O medidor deve ser ensaiado aterrando as partes previstas;
- A temperatura ambiente deve estar entre 20 °C e 30 °C;
- Os circuitos devem ter sido energizados por tempo suficiente para que alcancem a estabilidade térmica;
- Além disso, para os medidores polifásicos:
  - a) A sequência de fases deve estar como marcada no diagrama de conexões;
  - b) As tensões e as correntes devem estar equilibradas.

O ensaio deve ser realizado com tensão nominal à frequência nominal. Devem ser aplicados ao medidor corrente nominal e fator de potência iguais a 1 (um) e deve ser determinado o erro percentual. No caso de medidores multitensão, o ensaio deve ser feito para a maior tensão nominal especificada pelo fabricante.

As verificações a serem realizadas são:

- Verificar se o medidor apresenta funcionamento dos led's de calibração e funcionamento do display;
- Verificar se o medidor apresenta erros percentuais superiores aos estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de erros percentuais para medição de energia ativa

<b>Limites de erros percentuais para medidores - Por classe</b>			
Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
± 2,0	± 1,0	± 0,5	± 0,2

Fonte: Elaboração do autor

Já para as demais falhas: o medidor parar de registrar/registrar incorretamente e o medidor parar de mostrar o registro, o seguinte ensaio deve ser aplicado aos medidores para verificação de ocorrência das falhas:

- Aplicar 1,1 kWh para os medidores de energia ativa. A temperatura ambiente deve estar entre 20 °C e 30 °C e o medidor deve ser energizado com tensão nominal e corrente entre a nominal e a máxima.

As verificações a serem realizadas são:

- Verificar se a diferença entre o valor inicial e o valor final indicado pelo mostrador é de 1 kWh a 2 kWh;
- Verificar se o medidor apresenta erros percentuais superiores aos estabelecidos na Tabela 1, quando aplicado corrente nominal e fator de potência igual a 1 ao medidor.

Uma observação importante é que o display de medidores que não estejam mostrando o registro durante o ciclo de câmara térmica somente pode ser considerado como falha se o medidor não retornar à informação uma vez fora da câmara térmica.

#### 4.3.4 Definição dos Parâmetros $Ea$ e $n$

O modelo de estresse-vida a ser utilizado será o modelo de Peck, definido na seção 4.2.2. O fator de aceleração considerando o estresse de temperatura e de umidade desse modelo é visto na equação 24:

$$AF_p = \left( \frac{UR_u}{UR_s} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (28)$$

Dentre as variáveis dessa equação, tem-se: as condições normais de uso para umidade e temperatura, que serão definidas na seção 4.3.5; e também as condições

de estresse desses parâmetros, que serão definidas na seção 4.3.6. Além desses parâmetros, tem-se a constante de Boltzmann, de valor conhecido.

Assim sendo, restam duas variáveis ainda não exploradas: a energia de ativação,  $E_a$ , e uma constante experimental,  $n$ . Para determiná-las serão propostos dois métodos: o primeiro deles baseado em normas específicas e mais acessível; o segundo, baseado em ensaios mais custosos e dependente de um software específico, portanto trata-se de um método mais complexo.

A escolha do método a ser utilizado nos ensaios dependerá da viabilidade técnica e econômica para a realização desses ensaios e da possibilidade de uso do software citado. A metodologia utilizada em cada método é elucidada a seguir:

#### 1. Método de consulta a normas

O primeiro método para determinação de  $E_a$  e  $n$  é baseado na consulta de normas específicas. Para esse tipo de trabalho, a norma de referência é a “MIL-HDBK-217F - Reliability Prediction of Electronic Equipments”, de autoria do departamento de defesa dos Estados Unidos da América e que dispõe de parâmetros de referência para a confiabilidade de componentes eletrônicos. Dentre os parâmetros disponíveis, estão os valores de energia de ativação associada aos diversos mecanismos de falha dos componentes eletrônicos (38).

Energia de ativação é a energia necessária para possibilitar a reação de uma molécula constituinte de um determinado corpo (28) e o valor tabelado e que será adotado nesse método é o seguinte:  $E_a = 0,9 eV$

Quanto ao valor da constante experimental  $n$ , a norma brasileira ABNT NBR 16079 estabelece o valor típico de  $n = 3$ , que será o valor adotado nesse trabalho.

#### 2. Método experimental

O segundo modelo baseia-se na obtenção dos dados experimentalmente. Apesar de normas específicas possuírem esses valores tabelados, os ensaios de vida acelerada podem apresentar características particulares para cada equipamento, e por isso, esse método é o que proporciona a melhor exatidão nos resultados. Como consequência, os custos agregados à sua realização são consideravelmente maiores.

Para que esses dados sejam obtidos, é necessário a realização dos ensaios em, pelo menos, três níveis de estresse sendo que a umidade e a temperatura se mantenham constante em dois níveis. Abaixo segue três níveis de estresse que seguem essa premissa:

- Nível A: 65 °C e 73% de umidade relativa
- Nível B: 65 °C e 80% de umidade relativa
- Nível C: 75 °C e 80% de umidade relativa

Nesse exemplo, temos três níveis de estresse em que a temperatura se mantém constante em dois níveis (Níveis A e B) e a umidade relativa também se mantém constante em dois níveis (Níveis B e C).

A obrigatoriedade de que tanto a umidade quanto a temperatura se mantenham constante em pelo menos dois níveis tem razões matemáticas. Ao realizar os ensaios em níveis que, por exemplo, a umidade se mantenha constante e haja somente variação da temperatura, é possível a avaliação do efeito da variação de temperatura isoladamente. Nessa avaliação, obtêm-se o valor ótimo de  $E_a$ , que melhor se ajuste a um dos modelos matemáticos.

Da maneira semelhante é realizado o procedimento para o cálculo do valor de  $n$ . Como esse parâmetro tem influência direta na aceleração por umidade, mantém-se a temperatura constante e realiza-se os cálculos com a influência exclusiva da umidade.

#### **4.3.5 Definição das Condições Normais de Uso**

Para equipamentos instalados externamente, as condições normais de uso em temperatura e umidade dependem da condição climática que prevalece nos países nos quais o equipamento de medição está para ser instalado (20).

Em função das diferentes realidades climáticas encontradas no Brasil, é impossível estabelecer padrões de temperatura e umidade que representem todo o país. Por isso, é necessário o estabelecimento de condições normais de uso dos equipamentos para regiões menores, como por exemplo de estado a estado. Para esse trabalho serão utilizados os dados da capital do estado, Vitória.

Os motivos dessa escolha são baseados na disponibilidade de dados confiáveis e de maneira gratuita, além do entendimento que os dados relativos à

cidade de Vitória representam bem a região do estado onde há o maior número de unidades consumidoras, que é a Grande Vitória.

A norma preconiza que as condições de umidade e temperatura normais sejam definidas em termos de médias anuais. Para isso, foram obtidas o histórico de umidade, temperaturas máxima e mínimas dos últimos 30 anos e são mostrados abaixo:

Figura 21 - Histórico de umidade e temperaturas máximas e mínimas

Average High Temperature													Years on Record: 30	
	ANNUAL	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
C	28.5	30.9	31.6	31.1	29.4	27.9	26.7	25.9	26.6	26.5	27.3	28.2	29.6	

Average Low Temperature													Years on Record: 30	
	ANNUAL	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
C	21.3	23.1	23.7	23.4	22.3	20.8	19.5	18.8	19.2	19.8	20.8	21.6	22.4	

Average Relative Humidity													Years on Record: 30	
	ANNUAL	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
%	76.7	76	75	76	76	76	77	77	76	77	78	78	78	

Fonte: Site do Wheater Base (39)

Contudo, os procedimentos para os cálculos vão além de médias simples dos dados e os passos desse desenvolvimento são mostrados a seguir.

#### 4.3.5.1 Condição de temperatura

— Para cada temperatura mínima e máxima dos meses do histórico,  $T_i$ , deve ser calculado o fator de aceleração térmico, com  $E_a$  obtido em 4.3.4 e com referência na temperatura de 20 °C, ou 293K:

$$AF_T = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{293} - \frac{1}{T_i} \right)} \quad (29)$$

— Após isso, o valor médio  $AF_{tmed}$  deve ser calculado a partir de todos os valores obtidos no passo anterior;

— A temperatura média anual  $T_u$  para condições normais de uso deve ser calculada pela equação abaixo, que é basicamente a equação inversa da Equação 29:

$$T_u = \frac{1}{\frac{1}{293} - \frac{k \ln AF_{tmed}}{E_a}} \quad (30)$$

#### 4.3.5.2 Condição de umidade

— Para cada média mensal de umidade relativa  $UR_i$ , deve ser calculado o fator de aceleração pela umidade, com  $n$  obtido em 4.3.4 e com referência na umidade relativa de 50%, como segue:

$$AF_u = \left( \frac{50}{UR_s} \right)^{-n} \quad (31)$$

— Após isso, o valor médio  $AF_{umed}$  deve ser calculado a partir de todos os valores obtidos no passo anterior;

— A umidade média anual  $UR_u$  deve ser calculada pela abaixo que é basicamente a equação inversa da Equação 31:

$$UR_u = \frac{50}{AF_{umed}^{-\frac{1}{n}}} \quad (32)$$

#### 4.3.5.3 Definição dos parâmetros para os medidores da EDP Escelsa

Seguindo os passos descritos acima, os cálculos foram desenvolvidos e a planilha com os resultados obtidos são exibidos na Figura 22, utilizando o método de consulta as normas descrito em 4.3.4 para os parâmetros  $E_a$  e  $n$ :

Figura 22 - Planilhas de cálculo das condições de uso normal

Mês	$T_i$ (°C)		$AF_T$	$UR_i$ (%)	$AF_H$
Janeiro	Máx	30,9	3,59140	76	3,51181
	Mín	23,1	1,45238		
Fevereiro	Máx	31,6	3,88655	75	3,37500
	Mín	23,7	1,55976		
Março	Máx	31,1	3,67350	76	3,51181
	Mín	23,4	1,50516		
Abril	Máx	29,4	3,02849	76	3,51181
	Mín	22,3	1,32001		
Maio	Máx	27,9	2,54948	76	3,51181
	Mín	20,8	1,10193		
Junho	Máx	26,7	2,21866	77	3,65226
	Mín	19,5	0,94088		
Julho	Máx	26,6	2,19301	77	3,65226
	Mín	18,8	0,86364		
Agosto	Máx	27,3	2,37866	76	3,51181
	Mín	19,2	0,90702		
Setembro	Máx	25,9	2,02108	77	3,65226
	Mín	19,8	0,97595		
Outubro	Máx	26,5	2,16763	78	3,79642
	Mín	20,8	1,10193		
Novembro	Máx	28,2	2,63916	78	3,79642
	Mín	21,6	1,21361		
Dezembro	Máx	29,6	3,09842	78	3,79642
	Mín	22,4	1,33591		
		<b>Média</b>	1,98851	<b>Média</b>	3,60667

Condições de Uso			
$AF_{TMED}$	1,98851	$AF_{HMED}$	3,60667
$T_u$	25,76 °C	$UR_u$	76,68%

Fonte: Elaboração do autor



Portanto, as condições de uso aplicáveis aos ensaios serão:

— Temperatura = 25,76°C

— Umidade Relativa = 76,68%

A norma ainda prevê a correção de temperatura devido a variações de tensão e corrente, porém esse critério não será, a princípio, aplicado por questões de viabilidade técnica.

#### 4.3.6 Definição dos Ensaios e dos Níveis de Estresse

A norma estabelece 3 níveis de temperatura e 3 níveis de umidade, são eles:

$$T_{máx} = 85^{\circ}C ; T_{méd} = 75^{\circ}C ; T_{mín} = 65^{\circ}C$$

$$UR_{máx} = 87\% ; UR_{méd} = 80\% ; UR_{mín} = 73\%$$

A variação máxima absoluta permitida para as temperaturas e a umidade relativa estabelecidas são de  $\pm 1^{\circ}C$  e  $\pm 3\%$ , respectivamente. Além disso são estabelecidas as combinações que devem ser utilizadas nos ensaios, são elas:

$$T_{máx}UR_{máx} ; T_{máx}UR_{méd} ; T_{máx}UR_{mín} ; T_{méd}UR_{máx} ; T_{mín}UR_{máx}$$

O primeiro ensaio a ser realizado é o que possui as condições mais agressivas, no caso  $T_{máx}UR_{máx}$ . O objetivo deste ensaio é descobrir todos os principais modos de falha independentes do medidor e de suas distribuições de falha. A seguir, devem ser realizados os ensaios para as demais condições, com o objetivo de avaliar as variações dos fatores de aceleração para cada modo de falha, que serão definidos na seção seguinte.

Durante os ensaios, os equipamentos devem ser ligados em sua tensão nominal e submetidos à corrente de 10% da corrente nominal em cada nível de estresse. Quanto à duração dos ensaios, essa será descrita em 4.3.6.1 e quanto ao procedimento para coletar os dados de tempo até falhar, esse é descrito em 4.3.6.2.

##### 4.3.6.1 Procedimento para o término dos ensaios

O critério principal para o término dos ensaios é quando no mínimo cinco falhas tiverem sido observadas, para cada modo de falha principal. Para essa metodologia, serão considerados como modos principais de falha a queima do medidor e as falhas de indicação no display, que são responsáveis por cerca de 70% dos defeitos

registrados nos últimos 3 anos, pelo laboratório de análises metrológicas da EDP Escelsa.

Não obstante, independentemente do número de falhas registradas é determinado o tempo mínimo e o tempo máximo para a duração dos ensaios. A duração mínima,  $D_{min}$ , é calculada a partir da equação abaixo, descrita na norma ABNT 16078:

$$D_{min} = MAX \left( \frac{Y}{AF_{max}} \left[ \frac{\ln(1 - UCL_1)}{\ln \left( 1 - \frac{C \cdot F}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{\beta_1}}, \frac{Y}{AF_{max}} \left[ \frac{\ln(1 - UCL_1)}{\ln \left( 1 - \frac{C \cdot F}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{\beta_2}} \right) \quad (33)$$

Onde:

$Y$  - tempo para atingir o percentual de falha;

$AF_{max}$  - fator de aceleração no nível máximo de estresse;

$UCL_1$  - inconformidade estimada para um nível de confiança CL e um número de ordem 1;

$C$  - a contribuição mínima em percentual de um modo de falha para que o modo de falha não possa ser perdido;

$F$  - percentual de falha;

$\beta_1, \beta_2$  - parâmetros, mínimo e máximo, de um modo de falha para que o modo de falha não possa ser perdido.

Os parâmetros  $Y$  e  $F$  são os estabelecidos em 4.3.2, ou seja, 13 anos e 10% de falhas. Já  $AF_{max}$  é calculado a partir da equação do fator de aceleração temperatura e umidade de Peck, aplicado para a situação de estresse máximo, como segue:

$$AF_{max} = \left( \frac{UR_u}{UR_{max}} \right)^{-n} e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_{max}} \right)}$$

$$AF_{max} = \left( \frac{76,68}{87} \right)^{-3} e^{\frac{0,9}{8,617E-05} \left( \frac{1}{298,76} - \frac{1}{358} \right)}$$

$$AF_{max} = 475,1846$$

Quanto aos parâmetros  $C, \beta_1$  e  $\beta_2$ , estes estão relacionados aos critérios definidos quanto à aceitação de riscos para determinação da duração mínima dos ensaios. Isso é, quanto maior o tempo de ensaio, menores são os riscos de

informações relevantes se percam e, portanto, deve haver uma ponderação de critérios a serem utilizados e a avaliação dos riscos em função dos custos envolvidos.

Realizando essa avaliação, junto da equipe de engenharia de medição da EDP Escelsa, o resultado foi de que será admitido que os modos de falha, com  $\beta$  entre 0,5 e 5, com contribuição inferior a 15 % de todas as falhas em 13 anos com um nível de confiança de 50 % possam ser perdidos.

Quanto ao parâmetro  $UCL_1$ , este pode ser obtido a partir de tabelas de *median ranks*, ou rankings medianos, e é facilmente encontrada em bibliografias de confiabilidade. Esse valor representa a estimativa da não-confiabilidade da primeira amostra, dentre as trinta do ensaio, a partir da classificação mediana.

Isso posto, é possível o cálculo da duração mínima do ensaio a partir da Equação 33, como segue:

$$D_{min} = MAX \left( \frac{Y}{AF_{max}} \left[ \frac{\ln(1 - UCL_1)}{\ln \left( 1 - \frac{C.F}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{\beta_1}}, \frac{Y}{AF_{max}} \left[ \frac{\ln(1 - UCL_1)}{\ln \left( 1 - \frac{C.F}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{\beta_2}} \right)$$

$$D_{min} = MAX \left( \frac{13 \times 365 \times 24}{475,1846} \left[ \frac{\ln(1 - 0,0228)}{\ln \left( 1 - \frac{15 \times 10}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{0,5}}, \frac{13 \times 365 \times 24}{475,1846} \left[ \frac{\ln(1 - 0,0228)}{\ln \left( 1 - \frac{15 \times 10}{10000} \right)} \right]^{\frac{1}{5}} \right)$$

$$D_{min} = 558,10 h$$

Em resumo, mesmo que cinco falhas de cada modo principal de falha já tenham sido registradas, o ensaio prossegue até essa duração. Caso contrário, em que não seja observada o número de falhas estabelecido, o ensaio é encerrado com o seu tempo máximo, que é duas vezes o tempo mínimo calculado, ou seja 1116,20 horas; mesmo que menos de cinco falhas tenham sido observadas para um modo de falha principal.

#### 4.3.6.2 Procedimento para coletar dados de tempo até falhar

Durante os ensaios, nenhum equipamento deve ser reparado em caso de falha, devendo o equipamento ser retirado na continuidade dos ensaios e o seu tempo de falha contabilizado.

O tempo utilizado para verificação dos tipos de falhas na realização dos ensaios não pode ser considerado na computação do total do tempo para o ensaio de confiabilidade e caso haja equívoco na retirada do medidor do ensaio, o mesmo será classificado como suspensão. Em resumo, equipamento falhado é analisado, e o modo de falha é identificado, então o tempo da falha é registrado.

#### **4.3.7 Análise dos Dados de Laboratório**

Com a posse dos dados obtidos em laboratório, será realizado o tratamento dos dados via software e em seguida os resultados serão analisados e apresentados.

Para o tratamento via software, é recomendado o uso do software Alta, na sua versão 10.1 ou superior. Esse programa, também desenvolvido pela Reliasoft, é referência mundial em análise quantitativa para ensaios acelerados de vida, pois é o único software no mercado projetado para realizar análise quantitativa de dados obtidos nos ensaios de vida acelerados. Na indisponibilidade do uso do mesmo e dependendo das condições adotadas para o ensaio, descritas em 4.3.4, é possível o uso do software Weibull++.

Todavia, como esse programa foi projetado apenas para análise de dados de vida, é de se ressaltar a necessidade de tratamento prévio dos dados do teste, como por exemplo para cálculo do fator de aceleração, que deve ser feito de forma externa ao software.

Além disso, mesmo que o ensaio tenha sido realizado em mais de uma condição de stress, o Weibull++ não tem a capacidade de avaliar o grau de concordância do modelo escolhido e por isso, é esperada uma menor precisão dos resultados do que quando utilizado o Alta para diferentes níveis de stress.

O resultado das análises realizadas via software, juntamente com os requisitos para apresentação dos resultados são apresentados a seguir.

#### **4.3.8 Apresentação dos Resultados**

A apresentação dos resultados dos ensaios deve conter, minimamente, o seguinte:

— A identificação dos medidores sob ensaio, incluindo a marca, o modelo, o número de série, a tensão e a corrente nominais;

- O método de seleção de amostras, que deve ser aleatório;
- As características de vida a serem verificadas e o nível de confiança, que salvo em caso especial deve ser 10% de falha após 13 anos;
- O método para estabelecer quais falhas ocorreram;
- Os estresses e níveis de estresse aplicados conjuntamente, que salvo em condição especial devem ser os adotados em 4.3.6;
- Todos os valores de tempo até falhar registrados a cada nível de estresse e, para cada falha observada, o número de série do medidor, a classificação da falha e a causa-raiz da falha. Em caso do término do teste sem ter sido verificada a falha de um ou mais dos itens, será feito o registro o número de série do medidor, o tempo de exposição à condição de estresse, e a classificação como suspensão.
- A representação gráfica da distribuição de falhas linearizada a cada nível de estresse e para cada modo de falha;
- O resultado da qualidade de ajuste dos dados ao modelo escolhido, pelo método dos mínimos quadrados, para cada nível de estresse e para cada modo de falha;
- A condição de uso esperada para a qual a estimativa é feita e a correção de temperatura a ser aplicada às condições normais de uso, caso exista, para cada modo de falha;
- Todos os valores de tempo até falhar extrapolados para as condições normais de uso para cada modo de falha, suas representações gráficas, suas representações gráficas da distribuição de Weibull, ou do modelo melhor ajustado com os intervalos de confiança, e seus resultados quanto à qualidade de ajuste pelo método dos mínimos quadrados;
- Todos os resultados devem ser apresentados em duas vertentes para os limites de confiança: unilateral inferior, com o nível de confiança de 85%; e bilateral, também com nível de confiança de 85%.
- A representação gráfica da distribuição acumulativa final com seus intervalos de confiança;
- O resultado final das características de vida;

— Qualquer outra informação pertinente e necessária para interpretar corretamente os resultados do ensaio.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou desenvolver a metodologia para os ensaios de vida acelerada e também servir como base para os trabalhos futuros de confiabilidade no setor de engenharia de medição da EDP Escelsa. Foram estudados os normativos existentes, avaliando sua aplicabilidade e limitações, além dos conceitos de engenharia de confiabilidade.

Ademais, foi desenvolvida com sucesso a metodologia a ser utilizada nos ensaios em questão e, em conjunto com outros setores da empresa, está sendo operacionalizada a realização desses ensaios, em caráter inédito.

Em pesquisa de mercado, foi verificado que no mercado nacional existe apenas um laboratório com a infraestrutura adequada para realização dos testes, porém esse laboratório se encontra em contrato de regime de exclusividade, por um período de dois anos.

Devido a isso, foi viabilizada o envio da primeira remessa de medidores para o laboratório Lablec, em Portugal, onde os ensaios serão realizados. Para as demandas futuras, existe a intenção da estruturação própria de um laboratório capaz de realizar esses ensaios nas dependências da própria companhia.

Está relacionado com esse trabalho também, as novas condições estabelecidas para o fornecimento de medidores da EDP nos próximos dois anos. Diante da constatação de prejuízo financeiro com as falhas precoces, novas premissas foram estabelecidas como garantia para a distribuidora.

A mudança mais impactante nesses contratos está ligada ao ressarcimento do prejuízo financeiro à distribuidora, caso seja constatado, pelos ensaios de vida acelerada, mais de 10% de falha dos medidores após o prazo regulatório de 13 anos.

Portanto, entende-se que o trabalho atingiu o objetivo principal de operacionalizar e estabelecer a metodologia a ser utilizada para os ensaios de vida acelerada para os medidores da EDP Escelsa. Além disso, também foi atingido o objetivo de servir de base para trabalhos complementares de confiabilidade dentro da própria empresa.

O principal deles, que já está em curso no setor de engenharia de medição da EDP Escelsa, apresentará um estudo pleno da confiabilidade de medidores eletrônicos monofásicos instalados pela EDP Escelsa, desde a introdução dessa

tecnologia no mercado até os dias atuais. Esse trabalho que usará o Weibull++ como ferramenta computacional, está em fase de análise de dados e tem previsão de conclusão em dezembro de 2016.

Outro trabalho de grande relevância será elaborado com os dados provenientes dos ensaios de vida acelerada que estão sendo realizados pelo laboratório Lablec. Esse trabalho será utilizado como referência para a garantia das condições estabelecidas nos novos contratos de compra e também como embasamento para a realização de possíveis ações mitigatórias aos fabricantes.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) EDP Escelsa. Instalações ativas em Julho de 2016: Base de Dados. Serra, 2016. Base de dados do SAP GUI.
- (2) EDP Brasil. Histórico de Compras: Base de Dados. Serra, 2016. Base de dados do SAP GUI.
- (3) KLEINAU, B. A. **Proposta de uma Metodologia de Ensaios de Confiabilidade em Medidores de Energia**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Energia) – Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Recife, dezembro de 2014.
- (4) BONAT, J. A. J. Brazil's Energy Metering Stalemate. **Metering International**, Issue 3, v. 1, p. 59-62, 2012.
- (5) SKRABEC, Q. R. Jr. **George Westinghouse: gentle genius**. New York : Algora Pub, 2007.
- (6) SILVA, M. R. **Modelação e Análise da Vida Útil (Metrológica) de Medidores Tipo Indução de Energia Elétrica Ativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, agosto de 2010.
- (7) DYER, F. L.; MARTIN T. C. **Edison: His Life and Inventions**. New York: Harper & Brothers, 1910.
- (8) Site do Spark Museum of Electrical Invention. Apresenta informações e imagens sobre o Museu Spark de Invenções Elétricas, situado em Washington, EUA . Disponível em: <[http://www.sparkmuseum.org/collections/electricity-sparks-invention-\(1800-1900\)/edison-chemical-meter/](http://www.sparkmuseum.org/collections/electricity-sparks-invention-(1800-1900)/edison-chemical-meter/)>. Acesso em: 12 mai. 2016.
- (9) McPHERSON, S.S. **War of the Currents: Thomas Edison vs Nikola Tesla**. Minneapolis, Minnesota, USA: Twenty-First Century Books, 2013.
- (10) DOTTO, G. H. **Estudo do comportamento de medidores eletromecânicos de energia elétrica frente às distorções harmônicas de corrente**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2006.

- (11) SANTANA, T. A. S. **Engenharia Da Confiabilidade Aplicada À Medição De Energia Elétrica**. Monografia (Especialização em Engenharia de Confiabilidade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- (12) GONÇALVES, J. P. **Análise de Fiabilidade de Maquinas de Soldar Por Feixe De Electrões - Um Caso De Estudo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Manutenção Industrial) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2006.
- (13) FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- (14) Twitter da WKB – Concessionária Toyota no Reino Unido. Apresenta informações e imagens sobre os produtos da empresa. Disponível em: <<https://pbs.twimg.com/media/CTmq2y0XIAQ1I9p.jpg>>. Acesso em: 19 mai. 2016.
- (15) LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- (16) DANIEL, R. E. Testes de confiabilidade: o segredo da excelência na qualidade. **Grupo SEGS**. 16 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.segs.com.br/demais/4107-testes-de-confiabilidade-o-segredo-da-excelencia-na-qualidade.html>>. Acesso em: 14 set. 2016.
- (17) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5313**: Aceitação de lotes de medidores de energia ativa – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- (18) Eletra Energy Solutions. Apresenta informações e imagens sobre os produtos da empresa. Disponível em: <<http://www.eletraenergy.com/br>>. Acesso em: 14 set. 2016.
- (19) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico**. Brasília, 2009.
- (20) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16078**: Equipamentos de medição de eletricidade - Confiabilidade - Ensaio de confiabilidade - Vida acelerada por umidade e temperatura. Rio de Janeiro, 2012.

- (21) FREITAS, M. A. & COLOSIMO, A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Belo Horizonte, 1997.
- (22) NELSON, W. **Acelerated Testing**. Hoboken, New Jersey, USA : John Wiley & Sons, 2004.
- (23) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14521: Aceitação de Lotes de Medidores Eletrônicos**. Rio de Janeiro. 2011.
- (24) International Electrotechnical Commission. **IEC 60300-3-5, Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles**. Switzerland : IEC, 2001.
- (25) LEITCH, R. **Reliability Analysis for Engineering**. New York : Oxford Press, 1995.
- (26) BASSETO, I. F. F. **Estudo de Confiabilidade de Compressores Alternativos Semi-Herméticos de Sistema de Refrigeração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.
- (27) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro. 1994.
- (28) FÉLIX, E. P. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos Baseados em Ensaios de Vida Acelarada**. 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- (29) SOUZA, G. F. M. **Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos**. Apostila do Curso. São Paulo, 2003 *apud* FÉLIX, E. P. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos Baseados em Ensaios de Vida Acelarada**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- (30) CROWE, D e FEINBERG, A. **Design for Reliability**. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- (31) Portal Action. Um portal de estatística elaborado em conjunto pelas empresas Estatcamp e DigUp. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br>>. Acesso em: 29 set. 2016.

- (32) CARMINATI, R. C. **Análise de Vida Útil dos Medidores de Energia Elétrica na Baixa, Média e Alta Tensão da Edp Escelsa**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2012.
- (33) PINTO, J. M. A. **Modelagem de Testes Acelerados com Esforço Aplicados em Níveis em Estudo de Fadiga Mecânica**. 2004. São Paulo : Tese (Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - USP, 2004.
- (34) SASSERON, P. L. e ABACKERLI, A. J. **Uso do ensaio acelerado na determinação experimental da confiabilidade de relés**. XII SIMPEP. Novembro de 2005.
- (35) VASSILIOU, P. e METTAS, A. **Understanding accelerated life-testing analysis**. Seattle, Washington, EUA. Tutorial Notes of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002 apud SASSERON, P. L. e ABACKERLI, A. J. **Uso do ensaio acelerado na determinação experimental da confiabilidade de relés**. XII SIMPEP. Novembro de 2005.
- (36) SETTUR, S.; A.K.M., KUMAR; Y.V.S., LAKSHMI. **Evolution of Component Qualification Methods for Local Component Manufactures for Telecom Applications**. IEEE Transaction on Reliability, vol 47.1998 apud FÉLIX, E. P. **Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos Baseados em Ensaio de Vida Acelerada**. 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
- (37) PECK, D.S.; HALLBERG, O. **Recent Humidity Accelerations, a Base for Testing Standards**. Quality and Reliability Engineering International, vol. 7,169-180.1991.
- (38) UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-HDBK-217F Military Handbook: Reliability Prediction Of Electronic Equipment**. Washington, DC. 1991
- (39) Temperatura e Umidade em Vitória: Banco de dados. Disponível em: <<http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=94638&cityname=Vitória-Espirito-Santo-Brazil>>. Acesso em: 21 ago. 2016.
- (40) Reliasoft Corporation. **Accelerated Life Testing Reference**. 4 ed. Tucson, Arizona, USA. : Reliasoft, 2014.

- (41) **BORBA, J. L. Apostila de Engenharia de Manutenção do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária. Ifes Cariacica. 2009.**