

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

CAIO CÉSAR LIPPE MACEDO

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE BASEADA EM ENSAIOS
ACELERADOS DE VIDA: ESTUDO DE CASO DE LÂMPADAS
INCANDESCENTES E LED UTILIZADAS EM REFRIGERADORES**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

CAIO CÉSAR LIPPE MACEDO

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE BASEADA EM ENSAIOS
ACELERADOS DE VIDA: ESTUDO DE CASO DE LÂMPADAS
INCANDESCENTES E LED UTILIZADAS EM REFRIGERADORES**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rigoni

Co-orientador: Prof. José Flávio Ramos Júnior

CURITIBA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE BASEADA EM ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA: ESTUDO DE CASO DE LÂMPADAS INCANDESCENTES E LED UTILIZADAS EM REFRIGERADORES

por

CAIO CÉSAR LIPPE MACEDO

Esta monografia foi apresentada em 04 de setembro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

MACEDO, Caio. **Análise de Confiabilidade Baseada em Ensaios Acelerados de Vida: Estudo de Caso de Lâmpadas Incandescentes e LED Utilizadas em Refrigeradores**. 2018. 132 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Para atender à crescente demanda que o mercado consumidor exige, empresas de tecnologia e indústrias de diversos setores necessitam desenvolver seus produtos e componentes em um tempo cada vez menor. Para que este desenvolvimento tenha sucesso, ou seja que atenda todos os pré-requisitos conforme legislações vigentes dentre outros, é necessário testá-los em diversas condições e situações para aprova-lo. Normalmente em laboratórios de testes de empresas e indústrias e/ou laboratórios externos especializados em diversas áreas do conhecimento da Engenharia, a atenção principal está em homologar o produto ou componente por meio de testes normalizados, como ensaios “passa - não passa”, funcionais, ambientais, elétricos, mecânicos, de segurança, durabilidade. Estes ensaios são muito importantes para atingir a qualificação mínima exigida, porém não são capazes de estimar os parâmetros estatísticos de uma distribuição de probabilidade de vida e tampouco compreender os modos de falhas que poderão ocorrer fruto da condição de uso ao longo do tempo. Na indústria de refrigeradores, diversos componentes como, resistências, compressores, termostatos, placas eletrônicas e demais outros, são desenvolvidos e testados para serem integrados aos produtos. Este trabalho propõe a utilização de métodos e técnicas para realização de ensaios acelerados de vida para lâmpadas do tipo incandescente e LED, que fazem parte do sistema de iluminação dos refrigeradores. Destaca-se que a utilização dos métodos e técnicas de ensaios acelerados de vida realizados em lâmpadas incandescentes e lâmpadas LED, podem ser utilizados em todos os demais componentes que integram o refrigerador, porém vale ressaltar que cada componente possui físicas ou mecanismos de falhas diferentes e que uma nova abordagem de engenharia deve ser realizada para cada caso que se deseja estudar. Os ensaios de confiabilidade deste estudo foram realizados em condições operacionais e climáticas mais severas do que a condição normal de uso, afim de diminuir o tempo do ensaio. A lâmpada incandescente, quando submetidas aos ensaios acelerados de vida, apresentou comportamento de vida do tipo desgaste, com taxa de falha crescente e compatível com a referência normativa vigente. A lâmpada LED, quando submetidas as análises de dados de vida, apresentou comportamento aleatório, com taxa de falha constante e incompatível com a referência normativa vigente e com os dados de vida descritos no *datasheet* do fabricante.

Palavras-chave: Confiabilidade. Ensaio Acelerado de Vida. Análise de Dados de Vida. Lâmpada Incandescente. Lâmpada LED.

ABSTRACT

MACEDO, Caio. **Reliability Analysis Based on Accelerated Life Tests: Case Study of Incandescent and LED Lamps Used in Refrigerators**. 2018. 132 pages. Monography (Specialization in Reliability Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

To meet the growing demand demanded by the consumer market, technology companies and industries from various industries need to develop their products and components in an increasingly short time. In order for this development to be successful, that is, it meets all prerequisites in accordance with current legislation, among others, it is necessary to test them under various conditions and situations to approve it. Normally in laboratories of tests of companies and industries and/or external laboratories specialized in several areas of the knowledge of the Engineering, the main attention is in homologating the product or component through standardized tests, like tests “pass-not pass”, functional, environmental tests , electrical, mechanical, safety, durability. These tests are very important in order to achieve the required minimum qualification, but they are not able to estimate the statistical parameters of a probability distribution and also to understand the failure modes that may occur due to the condition of use over time. In the refrigerator industry, various components such as resistors, compressors, thermostats, electronic boards of others are developed and tested to be integrated into the products. This work proposes use method and techniques for performing accelerated life tests for incandescent and LED lamps, which are part of the refrigerator lighting system. It should be emphasized that the method and techniques of accelerated life tests performed on incandescent lamps and LED lamps can be used in all other components of the refrigerator, but it is worth mentioning that each component has different physical or fault mechanisms and that a new engineering approach must be performed for each case that one wishes to study. The reliability tests of this study were performed under more severe operating and climatic conditions than the normal use condition, in order to reduce the test time. The incandescent lamp, when subjected to the accelerated life tests, had a wearout behavior, with increasing failure rate on time and compatible with the current normative reference. The LED lamp, when subjected to the life data analysis, had a random behavior, with a constant failure rate and incompatible with the current normative reference and with the life data described in the manufacturer's datasheet.

Palavras-chave: Reliability. Accelerated Life Test. Life Data Analysis. Incandescent Lamp. LED Lamp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – As quatro etapas básicas para os ensaios acelerados.....	24
Figura 2.1 – Diodo emissor de luz, LED de potência.....	29
Figura 2.2 – Chip semiconductor de um LED.....	30
Figura 2.3 – Estrutura básica do LED	30
Figura 2.4 – Dissipação de calor do LED	31
Figura 2.7 – Características das lâmpadas incandescentes conforme NBR 14671 ..	34
Figura 3.1 – Principais distribuições de vida	40
Figura 3.2 – Efeitos do parâmetro de forma (Beta)	42
Figura 3.3 – Curva da banheira.....	43
Figura 3.4 – Efeitos do parâmetro de escala (Eta)	44
Figura 3.5 – Efeitos do parâmetro de locação (Gamma)	45
Figura 3.6 – Tipos de dados em LDA e QALT	46
Figura 3.7 – Tipos de estressamento	50
Figura 3.8 – Níveis de estresse.....	52
Figura 3.9 – Classificação dos ensaios acelerados quanto a duração, para um único nível de estressamento	53
Figura 3.10 – Classificação dos ensaios acelerados quanto a duração, com múltiplos níveis de estressamento.....	54
Figura 3.11 – Extrapolação dos dados.....	56
Figura 3.12 – Comportamentos do parâmetro B	58
Figura 3.13 – Comportamentos do parâmetro n.....	60
Figura 3.14 – Perfil do ciclo térmico	64
Figura 3.15 – Limites de confiança.....	68
Figura 3.16 – Fluxograma para análises de sistemas reparáveis e não-reparáveis..	72
Figura 3.17 – Tempos envolvidos em análise de confiabilidade de sistemas	73
Figura 4.1 – Projeto <i>SolidWorks</i> da placa controladora.....	76
Figura 4.2 – Projeto <i>SolidWorks</i> do bastidor de teste	77
Figura 4.3 – Projeto <i>SolidWorks</i> dos berços de teste.....	77
Figura 4.4 – Análise QALT com modelo T-NT para lâmpada incandescente 127V ..	84
Figura 4.5 – Métricas da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V	85
Figura 4.6 – Temperatura versus horas de vida	86
Figura 4.7 – Tensão versus horas de vida	87
Figura 4.8 – Interação do estressamento Arrhenius com IPL.....	88
Figura 4.9 – Interação do estressamento IPL com Arrhenius.....	89
Figura 4.10 – Gráfico de contorno do ensaio T-NT (Arrhenius – IPL)	90
Figura 4.11 – Análise QALT com modelo IPL para lâmpada incandescente 127V ...	92
Figura 4.12 – Métricas da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V	93

Figura 4.13 – Gráficos da confiabilidade modelo T-NT lâmpadas incandescentes 127V	94
Figura 4.14 – Gráficos da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V	95
Figura 4.15 – Análise QALT com modelo IPL para lâmpada incandescente 220V ...	96
Figura 4.16 – Métricas da confiabilidade dos ensaios IPL para lâmpadas 220V.....	97
Figura 4.17 – Gráficos da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 220V	98
Figura 4.18 – Ciclo térmico no compartimento do refrigerador, freezer e interno as lâmpadas LED com e sem aberturas de portas	101
Figura 4.19 – Análise LDA lâmpadas LED	102
Figura 4.20 – Métricas da confiabilidade LDA lâmpadas LED.....	103
Figura 5.1 – Confiabilidade na condição do teste acelerado de vida da NBR14671	108
Figura 5.2 – Efeito <i>flashover</i> em lâmpadas incandescentes	114
Figura 5.3 – Estressamento por passos de temperatura.....	116
Figura 5.4 – Transições rápidas de temperatura.....	116

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1 – Lâmpada incandescente 127V ou 220V.....	27
Fotografia 2.2 – Lâmpada LED e circuito eletrônico interno.....	27
Fotografia 4.1 – Painel frontal do bastidor de teste	78
Fotografia 4.2 – Medição de corrente elétrica na tensão elétrica de teste	79
Fotografia 4.3 – Programação da corrente elétrica na bancada de teste	80
Fotografia 4.4 – Bancada de teste e fonte de alimentação AC (Teste térmico)	81
Fotografia 4.5 – Bancada de teste, fonte de alimentação AC e multímetro como medidor de temperatura (Teste não-térmico).....	81
Fotografia 4.6 – Evolução da análise de causa raiz RCA	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Outros modelos LSR utilizados em QALT	67
Quadro 4.1 – Combinação de ensaios T-NT lâmpada incandescente 127V	84
Quadro 4.2 – Combinação de ensaios IPL lâmpada incandescente 127V.....	91
Quadro 4.3 – Métricas complementares da confiabilidade dos ensaios T-NT e IPL para lâmpadas 127V	93
Quadro 4.4 – Métricas complementares da confiabilidade dos ensaios IPL para lâmpadas 220V	97
Quadro 4.5 – Métricas da confiabilidade das análises LDA lâmpadas LED.....	104
Quadro 5.1 – Principais informações do <i>datasheet</i> da lâmpada e diodo LED.....	111
Quadro 5.2 – Análise térmica das temperaturas de junção do LED	111

LISTA DE TABELAS

Tabela A1 – Dados QALT do tipo T-NT das lâmpadas incandescentes 127V	122
Tabela A2 – Dados QALT do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 127V	126
Tabela A3 – Dados QALT do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 220V	128
Tabela A4 – Dados de campo para LDA das lâmpadas LED	130

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Alternating Current
CC	Continuous Current
CDF	Cumulative Density Failure
FTD	Fault Tree Diagram
GLL	General Log-Linear
IC	Intervalo de Confiança
IEC	International Electrotechnical Commission
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
IPL	Inverse Power Law
ISTMT	In Situ Temperature Measurement Test
LDA	Life Data Analysis
LRU	Lowest Reparable Unit
LSR	Life Stress Relationship
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MTBDE	Mean Time Between Downing Event
MTBF	Mean Time Between Failure
MTBR	Mean Time Between Replacements
MTTF	Mean Time To Failure
MTTFF	Mean Time To First Failure
NBR	Norma Brasileira
PCB	Printed Circuit Board
PDF	Probability Density Function
PIC	Programmable Interface Controller
PPH	Proportional Hazards
RBD	Reliability Block Diagram
RCA	Root Cause Analysis
RDA	Recurrent Event Data Analysis
RGA	Reliability Growth Analysis
RRX	Rank Regression on X
RRY	Rank Regression on Y
RTD	Root Cause Analysis
T-H	Temperature-Humidity
TMP	Temperature Measure Point
T-NT	Temperature-Non Thermal
TR	Technical Report
TTF	Time To Failure
UL	Underwriters Laboratories
USB	Universal Serial Bus

LISTA DE ACRÔNIMOS

ALTA	Accelerated Life Test Analyzer
ANSI	American National Standard Institute
HALT	Highly Accelerated Life Test
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
LED	Light Emitting Diode
QALT	Quantitative Accelerated Life Test
URA	Usage Rate Accelerated

LISTA DE SÍMBOLOS

- T_j – Temperatura de junção do semicondutor LED, dado em (°C)
- T_A – Temperatura ambiente no qual o LED está incorporado, dado em (°C)
- R_{th} – Resistência térmica da junção na região ativa com o ambiente, dado em (°C/Watts)
- P_d – Potência elétrica média dissipada no LED, dado em (Watts)
- L_0 – Vida nominal equivalente de projeto, dado em (horas)
- L – Vida na tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (horas)
- U_0 – Tensão elétrica nominal de projeto, dado em (Volts)
- U – Tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (Volts)
- n – Constante da equação de vida da lâmpada incandescente, vale 13 para lâmpada com enchimento a vácuo e 14 para lâmpada com enchimento a gás. Equivalente a constante n da relação vida estresse IPL
- P – Potência nominal na tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (Watts)
- P_0 – Potência nominal de projeto, dado em (Watts)
- \emptyset – Fluxo luminoso na tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (Lúmens)
- \emptyset_0 – Fluxo luminoso nominal de projeto, dado em (Lúmens)
- LPW – Eficiência luminosa na tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (Lúmens/Watt)
- LPW_0 – Eficiência luminosa na tensão nominal de projeto, dado em (Lúmens/Watt)
- T – Temperatura do filamento na tensão elétrica aplicada ao teste, dado em (°C)
- T_0 – Temperatura do filamento nominal de projeto, dado em (°C)
- T_s – Temperatura da região da junção de soldagem do LED com a placa eletrônica, dado em (°C)
- T_c – Temperatura de encapsulamento do LED, dado em (°C)
- T_b – Temperatura dos módulos do LED, dado em (°C)
- LT_{CAP} – Vida do capacitor eletrolítico ou o tempo no qual o capacitor deve ter para atingir o mesmo ou o maior valor de tempo da vida do LED, dado em (horas)
- t_{TQ} – Tempo do teste de qualificação, ou o tempo que o capacitor leva para se degradar, nas condições de ensaio, para que a intensidade luminosa do LED reduza a 90% do seu valor inicial, dado em (horas)

T_M – Temperatura máxima da categoria climática do capacitor, normalmente descrito no corpo do componente, dado de fabricante, dado em (°C)

T_{CP} – Temperatura medida na carcaça do capacitor quando opera em sua condição normal de funcionamento no interior da lâmpada e está na temperatura ambiente de ensaio, dado em (°C)

$f(t)$ – Função densidade de probabilidade PDF

$R(t)$ – Função sobrevivência ou confiabilidade até o tempo t

$F(t)$ – Função probabilidade acumulada de falha ou não confiabilidade CDF até o tempo t

β – Parâmetro de forma ou inclinação, Beta, de uma distribuição Weibull

η – Parâmetro de escala ou vida característica, Eta, de uma distribuição Weibull

γ – Parâmetro de locação ou localização, Gamma, de uma distribuição Weibull

$MTTF$ – Tempo médio até a falha, dado em (horas)

$\lambda(t)$ – Taxa de falha no tempo t

$R(t'|t)$ – Confiabilidade condicional para um tempo t' de missão

$R(t + t')$ – Confiabilidade para um tempo t' de missão, para amostras que não falharam até o tempo t

A_{ep} – Constante empírica da relação vida estresse

B_{md} – Função que descreve o modelo da relação vida estresse

T_R – Vida confiável para a confiabilidade R desejada

Vida BX – Percentil ou tempo no qual se espera que uma determinada porcentagem de produtos ou itens falhem

$R(T)$ – Velocidade da reação em função da temperatura T , relação Arrhenius

A – Constante não térmica, relação Arrhenius

Ea – Energia de ativação, relação Arrhenius

k – Constante de Boltzmann's ($8,617385 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$), relação Arrhenius

T – Temperatura absoluta, dado em (Kelvin), relação Arrhenius

$L(V)$ – Medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função do nível de estresse, para todas as relações vida estresse

V – Nível do estresse em valores unitários e positivos, para as relações vida estresse Arrhenius e IPL

C – Constante de posição não térmica do material a ser determinado pelos dados ($C > 0$), relação vida estresse Arrhenius e T-NT

B – Fator de estressamento, mede o efeito que a temperatura tem sobre a vida e pode ser determinado diretamente sobre a relação da energia de ativação com a constante de Boltzmann's ($B = \frac{Ea}{k}$), relação vida estresse Arrhenius e T-NT

AF – Fator de aceleração do modelo, para todas as relações vida estresse

V_U – Nível de estressamento V na condição de uso, relação vida estresse Arrhenius, IPL e T-NT

V_A – Nível de estressamento V na condição acelerada, relação vida estresse Arrhenius, IPL e T-NT

$f(t, V)$ – Função densidade de probabilidade PDF em função de um único estressamento V , para todas as relações vida estresse

K – Constante de posição a ser determinado pelos dados, relação IPL

n – Fator de estressamento, mede o efeito que o estímulo tem sobre a vida, relação IPL

N – Número de ciclos térmicos até a falha, relação vida estresse IPL Coffin-Manson e Norris-Landzberg

C_{CF} – Constante, característica do metal a ser determinado pelos dados, relação vida estresse IPL Coffin-Manson

m – Constante empírica de fadiga do metal, relação vida estresse IPL Coffin-Manson

ΔT – Variação da faixa de temperatura $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, relação vida estresse IPL Coffin Manson e Norris-Landzberg, dado em ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_U – Variação da faixa térmica na condição de uso, relação vida estresse IPL Coffin-Manson e Norris-Landzberg, dado em ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_A – Variação da faixa térmica na condição acelerada, relação vida estresse IPL Coffin-Manson e Norris-Landzberg, dado em ($^{\circ}\text{C}$)

$f(t, \Delta T)$ – Função densidade de probabilidade PDF em função de um único estressamento ΔT , relação vida estresse Coffin-Manson e Norris-Landzberg

f – Frequência da ciclagem térmica, relação vida estresse Norris-Landzberg, dado em (ciclos/tempo)

T_{max} – Temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica, relação vida estresse Coffin-Manson e Norris-Landzberg, dado em ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} – Temperatura no limite mais fria da ciclagem térmica, relação vida estresse Coffin-Manson e Norris-Landzberg, dado em (°C)

X – Constante, característica do material e deve ser obtido pelo método de regressão linear (pelos dados), relação vida estresse IPL Norris-Landzberg

Y – Fator de estressamento, mede o efeito que o estímulo tem sobre a vida, deve ser obtido pelo método de regressão linear (pelos dados), relação vida estresse IPL Norris-Landzberg

Z – Fator de estressamento, mede o efeito que o estímulo tem sobre a vida, deve ser obtido pelo método de regressão linear (pelos dados), relação vida estresse IPL Norris-Landzberg

f_U – Frequência da ciclagem térmica na condição de uso, relação vida estresse IPL Norris-Landzberg, dado em (ciclos/tempo)

f_A – Frequência da ciclagem térmica na condição acelerada, relação vida estresse IPL Norris-Landzberg, dado em (ciclos/tempo)

T_{max_U} – Temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica na condição de uso, dado em (°C)

T_{max_A} – Temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica na condição acelerada, dado em (°C)

$L(U, V)$ – Medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função do nível de dois estressamentos, U e V , para a relação vida estresse T-NT

U – Nível do estressamento não-térmico em valores unitários e positivos, para a relação vida estresse T-NT

U_U – Nível de estressamento não-térmico U na condição de uso, relação vida estresse T-NT

U_A – Nível de estressamento não-térmico U na condição acelerada, relação vida estresse T-NT

$f(x, v; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ – Função densidade de probabilidade com observações independentes de variáveis contínuas em função do nível de estressamento em função dos parâmetros da distribuição de vida e do modelo do estressamento

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ – Parâmetros da distribuição de vida e do modelo de estressamento

$x(v)$ – Variável contínua (tempo) em função do nível de estressamento v

$(x_1, v_1), (x_2, v_2), \dots, (x_N, v_N)$ – Observações independentes de variáveis contínuas x com seus respectivos estressamentos v

B_{10} – Tempo no qual se espera que 10% dos produtos ou itens falhem

B_{50} – Tempo no qual se espera que 50% dos produtos ou itens falhem

B_{90} – Tempo no qual se espera que 90% dos produtos ou itens falhem

C_{SW} – Ciclos de chaveamento, *datasheet* lâmpada LED, dado em (ciclos)

V_{in} – Tensão de entrada AC, *datasheet* lâmpada LED, dado em (Volts AC)

F_r – Frequência de entrada AC, *datasheet* lâmpada LED, dado em (Hertz)

T_{opr} – Temperatura de operação, *datasheet* LED, dado em (°C)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo Geral.....	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	JUSTIFICATIVA	22
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	24
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REFRIGERADOR – SISTEMA DE ILUMINAÇÃO	26
2.1	TIPOS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA REFRIGERADORES	26
2.2	CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS.....	27
2.2.1	Funcionalidade da Lâmpada Incandescente	28
2.2.2	Funcionalidade da Lâmpada LED	28
2.3	REFERÊNCIAS NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA.....	32
2.3.1	Lâmpada Incandescente e a Norma NBR 14671	32
2.3.2	Lâmpada LED e a Portaria 389 do INMETRO.....	35
2.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 2	38
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	39
3.1	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DE VIDA.....	39
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE DADOS EM ANÁLISES DE VIDA..	45
3.3	ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA	48
3.3.1	Aceleração por Uso Contínuo ou Taxa de Uso	49
3.3.2	Aceleração por Sobrecarga.....	50
3.3.3	Níveis de Estressamento.....	52
3.3.4	Tipos de Carregamentos de Estresse	53
3.3.5	Relações Vida Estresse Constantes no Tempo (Independentes)	55
3.4	OUTROS CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE.....	68
3.4.1	Intervalos ou Limites de Confiança.....	68
3.4.2	Estimadores e ajustes de dados de vida	69
3.4.3	Confiabilidade de Sistemas Reparáveis e Não-Reparáveis	71
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 3	74
4	DESENVOLVIMENTO	75
4.1	CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES	75
4.2	DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO.....	79
4.3	ANÁLISES DE CONFIABILIDADE	82
4.3.1	Análise QALT em Lâmpada Incandescente 127V	83

4.3.2	Análise QALT em Lâmpada Incandescente 220V	96
4.3.3	Análise LDA em Lâmpada LED Bivolt	99
4.4	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4	104
5	CONCLUSÕES	106
5.1	RESULTADOS OBTIDOS E REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	107
5.1.1	Resultado Obtido Lâmpadas Incandescentes e a Norma NBR 14671 ..	107
5.1.2	Resultado Obtido Lâmpada LED e a Portaria 389 do INMETRO	109
5.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS	113
5.2.1	O Efeito Flashover na Bancada de Testes	114
5.2.2	O Ensaio Qualitativo Altamente Acelerado - HALT	115
5.3	TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A – DADOS PARA QALT E LDA	121

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve todo o conteúdo base do trabalho, que se inicia com as dificuldades encontradas e as premissas para o desenvolvimento da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, a justificativa, o procedimento metodológico utilizado e toda a estrutura necessária para a abordagem do tema proposto.

Os fabricantes de eletrodomésticos e de diversos outros setores produtivos da indústria e de tecnologia, como automobilístico, aeronáutica, médica, dentre outros, realizam sistematicamente diversos testes e ensaios em seus produtos e componentes afim de atender normas de segurança, ambiental e demais outras legislações referentes a cada setor ou área específica. Muitos ensaios também são realizados para garantir a qualificação exigida de projeto, como testes funcionais, atendimento de especificações técnicas (elétrica, mecânica, dimensional, física e climática) e durabilidade, porém nenhum destes ensaios são capazes de estimar a confiabilidade, a vida média e a taxa de falha com base em um comportamento estatístico de falhas, ou seja, não é possível determinar a probabilidade de um produto ou componente operar sem apresentar falhas em um tempo específico desejado, sob condições de uso conhecidos.

As análises de confiabilidade baseado em ensaios acelerados de vida QALT (*Quantitative Accelerated Life Test*) é baseado nos conceitos de análises de dados de vida LDA (*Life Data Analysis*), e tem como objetivo estimar as métricas da confiabilidade (probabilidade de falha ou sobrevivência, vida média, taxa de falha e etc.) em um tempo de teste significativamente reduzido, além de revelar os mecanismos de falhas latentes dos produtos ou componentes, por meio de acelerações na taxa de uso ou por carregamentos de estresse que impactam diretamente na vida do produto ou componente.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Os maiores desafios teóricos e práticos para utilizar as técnicas e métodos de ensaios acelerados de vida podem ser relacionados conforme abaixo:

- Deve-se entender claramente como e de que maneira a falha do produto ou componente ocorre, quais os mecanismos de falha existentes, qual a relação da falha com as condições de uso (temperatura, umidade, pressão, tensão elétrica, e outros), para isso exige-se profundo conhecimento de engenharia e das físicas das falhas. A norma NBR-5462 (ABNT, 1994) define mecanismo de falha como “conjunto de processos físicos, químicos ou outros que conduzem a uma falha”;
- As bancadas de testes devem ser construídas para atender todas as expectativas do ensaio acelerado, no que diz respeito a duração do ensaio, níveis e meios de estressamento;
- O sistema de coleta de dados do ensaio deve ser eficiente, preferivelmente de forma automatizada, afim de minimizar as incertezas envolvidas da bancada de teste;
- Recursos como equipamentos de testes e medição, bancadas de testes, câmaras térmicas e softwares para cálculos estatísticos de confiabilidade ou contratação de laboratórios de ensaios especializados ou consultorias, devem fazer parte das previsões anuais de investimentos das empresas e indústrias que desenvolvem produtos e componentes. Profissionais do nível de gerência devem estar envolvidos para que um bom programa de testes acelerados de vida seja um sucesso.

Com as premissas atendidas e as dificuldades superadas, é necessário responder as principais perguntas sobre as métricas da confiabilidade propostas pela pesquisa, por exemplo: Qual a probabilidade de um produto ou componente operar sem falhas, na condição de uso ao qual foi especificado no período de 1 ano? Qual a taxa de falha em 1 ano? Qual a vida média esperada?

1.2 OBJETIVOS

Este item apresenta os objetivos, geral e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Estimar os parâmetros de confiabilidade, de lâmpadas do tipo incandescente e LED (*Light Emmiting Diode*), que fazem parte do sistema de iluminação dos refrigeradores utilizando técnicas de ensaios acelerados de vida.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Compreender os mecanismos de falhas existentes nas lâmpadas LED por meio de análises RCA (*Root Cause Analysis*);
- Fazer análises de dados de vida LDA (*Life Data Analysis*) em lâmpadas LED;
- Realizar ensaio altamente acelerado, qualitativo, HALT (*Highly Accelerated Life Testing*) em lâmpadas LED;
- Realizar ensaio acelerado de vida QALT (*Quantitative Accelerated Life Testing*) em lâmpadas incandescentes.

1.3 JUSTIFICATIVA

Observa-se facilmente que o termo confiabilidade é bastante utilizado de forma inadequada, normalmente o termo confiabilidade é confundido com durabilidade. A norma NBR-5462 (ABNT, 1994) define durabilidade como sendo a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob dadas condições de uso e manutenção, até que um estado limite seja alcançado”, ou seja a durabilidade é definida por meio de uma especificação, onde a vida de um produto a partir deste ponto de vista pode ser interpretada como sendo aquela capaz de atingir uma meta, como por exemplo, a quantidade de ciclos de operações de um determinado produto devem atingir uma quantidade especificada em projeto, e se, ao atingir a meta o mesmo pode ser considerado como aprovado. A norma NBR-5462 (ABNT, 1994) define confiabilidade como sendo “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

Com este trabalho ficará claro as diferenças entre testes de durabilidade e teste de confiabilidade por meio dos ensaios acelerados de vida do estudo de caso proposto, lâmpadas incandescentes e LED. Segundo Pallerosi (2006), o termo confiabilidade é utilizado sem o conhecimento de sua definição e do seu equacionamento matemático no cotidiano de cada pessoa, e que a confiabilidade pode ser também conhecida como a qualidade em função da durabilidade.

Com a crescente demanda por desenvolver produtos em menor intervalo de tempo possível, e pela necessidade de se conhecer os parâmetros da distribuição estatística dos tempos até as falhas, a utilização dos métodos e técnicas de ensaios acelerados de vida é uma ótima oportunidade de redução de custos. Esta técnica permite se antecipar e conhecer os principais modos de falhas que o produto terá sob determinadas condições de uso e em qual intervalo de tempo as falhas poderão ocorrer, assim sendo as grandes companhias poderão prever seus custos de pós-venda, alinhar o período de garantia que melhor se ajusta ao modelo de negócios.

É fundamental que grandes organizações, empresas e indústrias, possuam sistemas de coletas de dados (modos de falha, tempo até a falha e etc.) altamente confiáveis para possibilitar as análises de confiabilidade na condição real de uso. Estas análises são conhecidas como análise dados de vida, onde o campo fornece os dados necessários para as análises de confiabilidade.

A precisão e credibilidade de quaisquer estimativas de parâmetros são altamente dependentes da qualidade, precisão e integridade dos dados fornecidos. Bons dados, juntamente com a escolha apropriada do modelo, geralmente resultam em boas estimativas de parâmetros (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 71).

Portanto, em situações onde os dados de campo são pouco confiáveis, é necessário utilizar ensaios acelerados de vida para se obter boas estimativas de parâmetros da confiabilidade por meio dos dados reproduzidos em bancadas de teste com ambientes e funcionalidades controladas.

Este trabalho pode ser justificado também, pela carência de análises de confiabilidade de lâmpadas incandescentes e LED utilizadas em refrigeradores, ou seja, sob condições de uso bastante específicas. Os ensaios acelerados de lâmpadas incandescentes e LED proporcionam uma ótima oportunidade de conhecer e comparar as duas tecnologias envolvidas, principalmente no que se refere ao comportamento dos modos de falha e confiabilidade.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

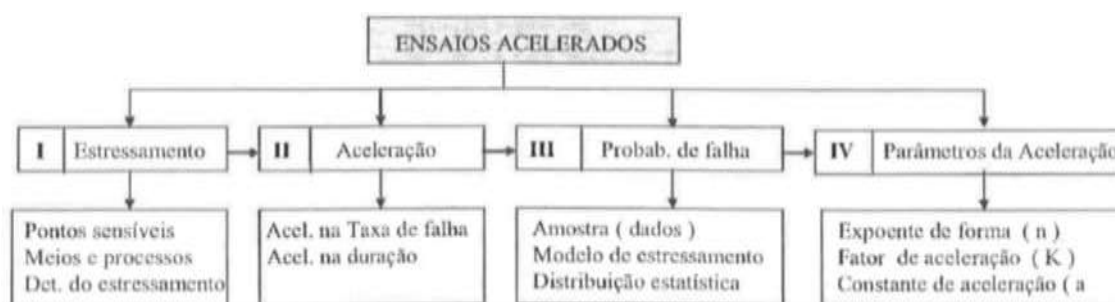
O trabalho inicia com o entendimento dos mecanismos de falhas que ocorrem em lâmpadas incandescentes e LED por meio de análises realizadas em peças retornadas de campo ou por meios de ensaios altamente acelerados, quando há dúvidas de compreender qual o fator, o estresse que está melhor relacionado com o modo de falha em análise. Como existem tecnologias de lâmpadas diferentes sob estudo, especialmente lâmpadas LED, cabe a necessidade de utilização de equipamentos complexos de teste e medição para investigação dos modos de falha, como microscópio eletrônico de varredura e raio x.

A coleta de dados do trabalho se dará de forma automatizada, afim de garantir a qualidade e confiança dos dados obtidos, portanto uma bancada de testes deverá ser construída para atender os requisitos de funcionalidade e monitoração de grandezas elétricas. Junto a bancada de teste, faz parte do arranjo físico do ensaio a utilização de câmaras térmicas e fontes de alimentação AC controladas, pois é necessário reproduzir as condições térmicas e elétricas envolvidas no planejamento e projeto do ensaio acelerado.

Conforme metodologia proposta por Pallerosi (2007), a sequência lógica básica para a realização dos ensaios acelerados de vida deve seguir conforme abaixo:

- Escolha do estressamento;
- Escolha do tipo de aceleração;
- Determinação das probabilidades de falha;
- Determinação dos parâmetros da aceleração.

Figura 1.1 - As quatro etapas básicas para os ensaios acelerados



Fonte: Pallerosi (2007).

Para a determinação das probabilidades de falha e os parâmetros de aceleração serão utilizados os softwares ALTA da Reliasoft e Minitab.

A proposta de utilização das técnicas de ensaio deverá promover a união de ensaios acelerados qualitativos e quantitativos em um único processo de teste.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após introdução do trabalho proposto, os próximos capítulos estão divididos da seguinte maneira:

- Capítulo 2 aborda o objeto da pesquisa, lâmpadas incandescentes e LED;
- Capítulo 3 trata todo o referencial teórico de engenharia da confiabilidade, análise de dados de vida, ensaios acelerados de vida;
- Capítulo 4 interliga todo o referencial teórico abordado no capítulo 3 com o objeto da pesquisa do capítulo 2 e demonstra os resultados obtidos nos ensaios acelerados das lâmpadas incandescentes e análise de dados de vida das lâmpadas LED;
- Capítulo 5 explicita de maneira analítica as conclusões obtidas em cada um dos ensaios acelerados e análises de dados de vida.

2 REFRIGERADOR – SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Este capítulo aborda o sistema de iluminação refrigeradores, particularmente as lâmpadas incandescentes e LEDs, as quais são os objetos de pesquisa deste trabalho.

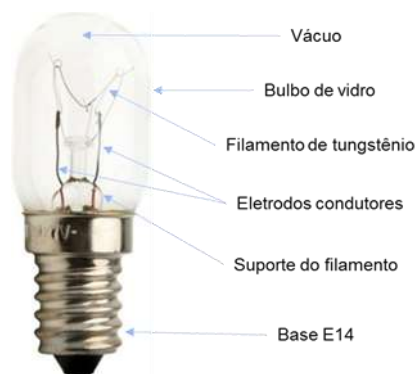
O refrigerador é composto por sistemas de refrigeração, controle de temperatura, degelo, isolamento PU (poliuretano) e sistema de iluminação. Como não é o sistema que compromete a principal função do um refrigerador, ou seja, conservar e preservar alimentos, o sistema de iluminação cumpre um papel fundamental na decisão de compra de um produto pelo consumidor, tanto que é objeto de estudo pelas equipes de *design* e *marketing* dos fabricantes de refrigeradores. Como parte integrante do produto, os sistemas de iluminação também falham e geram reclamações no campo comprometendo os índices da qualidade e de satisfação do consumidor. Não é foco deste trabalho justificar os motivos pelos quais levam os fabricantes de refrigeradores decidir qual o sistema de iluminação mais adequado a ser utilizado.

2.1 TIPOS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA REFRIGERADORES

Os sistemas de iluminação podem ser formados por lâmpadas do tipo incandescente, lâmpada do tipo LED ou placas eletrônicas de iluminação com LED de alto brilho acoplado, também chamado de sistema de iluminação de estado sólido. As lâmpadas do tipo incandescente e LED podem ser alimentadas separadamente em 127Vac e 220Vac, porém as do tipo LED podem também ser fabricadas e comercializadas como bivolt, ou seja, podem ser alimentadas em tensões 127Vac ou 220Vac. As placas eletrônicas de iluminação com LED acoplado podem ser construídas de forma customizada, afim de satisfazer as necessidades de projeto do refrigerador, portanto as alimentações podem ser diversas, as mais comuns são 127Vac, 220Vac, bivolt, 12Vcc ou 5Vcc.

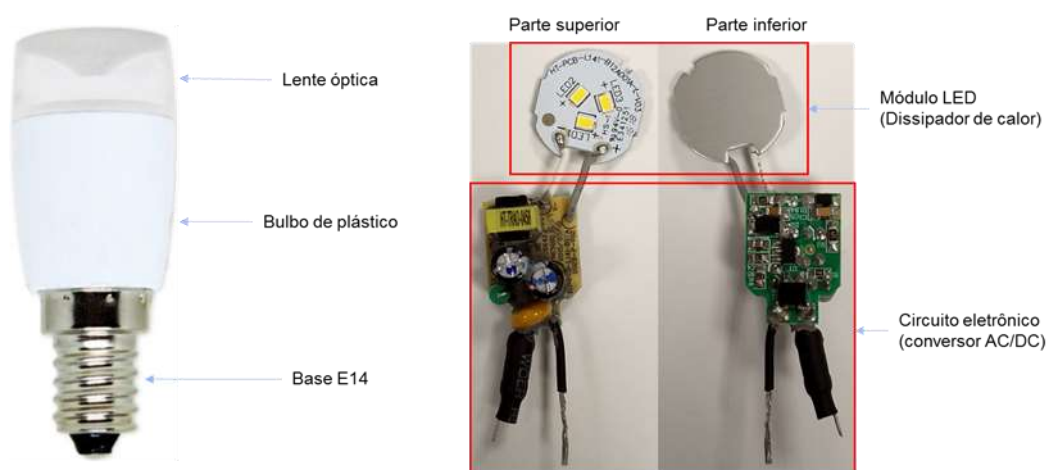
O foco desse trabalho são as lâmpadas incandescente mostrado na Fotografia 2.1 e LED mostrado na Fotografia 2.2 respectivamente.

Fotografia 2.1 – Lâmpada incandescente 127V ou 220V



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 2.2 – Lâmpada LED e circuito eletrônico interno



Fonte: Autoria própria.

Lâmpadas incandescentes e LED possuem características construtivas e funcionais totalmente diferentes uma da outra e, portanto, mecanismos de falha diferentes.

2.2 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS

Para o desenvolvimento do trabalho, é necessário entender como as lâmpadas incandescentes e LED funcionam e, quais as diferenças tecnológicas envolvidas em cada uma delas.

2.2.1 Funcionalidade da lâmpada incandescente

A lâmpada incandescente como a conhecemos emite luz através do fenômeno da incandescência, provocado pela passagem de uma corrente elétrica em um filamento de tungstênio sob condições de vácuo ou gás inerte.

A lâmpada funciona através da passagem da corrente elétrica pelo filamento de tungstênio que, com o aquecimento, gera luz. Sua oxidação é evitada pelo vácuo ou pela presença de gás inerte dentro do bulbo onde está o filamento (FELICÍSSIMO, 2004, p. 53).

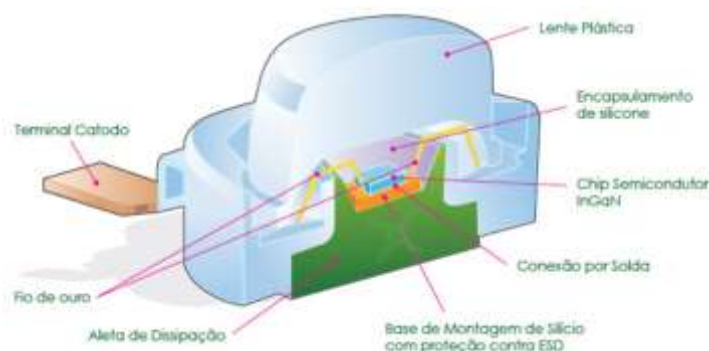
Segundo Felicíssimo (2004) o projeto do fio de tungstênio, que pode atingir temperaturas equivalentes a 3410°C, é determinado conforme o uso a que se destina a lâmpada e as necessidades de potência e vida útil, tendo por objetivo produzir luz da maneira mais econômica e eficiente possível.

Para lâmpadas com potência inferior a 40W, o preenchimento do volume interno do bulbo de vidro é do tipo, vácuo, o que impede a reação química com moléculas de oxigênio que faz o tungstênio alterar o seu estado físico da matéria de sólido para gasoso, evaporar. Lâmpadas com potência superior a 40W, o preenchimento normalmente é feito por meio de uma mistura de gases inertes que não reagem quimicamente com o tungstênio, normalmente feitos por meio de uma mistura de argônio com nitrogênio, o que também reduz o efeito de evaporação do tungstênio.

2.2.2 Funcionalidade da lâmpada LED

A lâmpada LED é formada basicamente por um circuito eletrônico responsável por converter a tensão AC da rede de distribuição de energia elétrica em tensão CC para alimentação do módulo de LED. O módulo é formado por um ou mais dispositivos semicondutores que emitem luz e que faz jus ao significado da sigla LED, *Light Emitting Diode*, que em português significa diodo emissor de luz. O diodo emissor de luz construído para iluminação de ambientes, é formado basicamente conforme Figura 2.1.

Figura 2.1 – Diodo emissor de luz, LED de potência



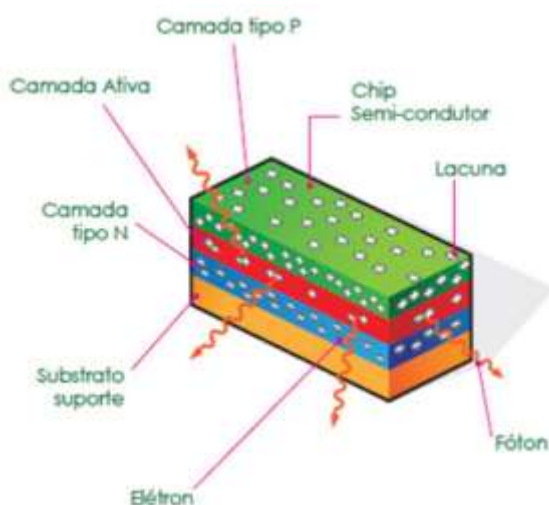
Fonte: Adaptado de Conex led (2018).

O LED é um componente do tipo bipolar equivalente a um diodo comum, possui dois terminais, chamados anodo e catodo, que dependendo da polarização permite ou não a passagem da corrente elétrica e conseqüentemente a geração ou não de luz.

O que difere um diodo semicondutor de um LED, além das características construtivas específicas para as funções aos quais cada um foi projetado, são os elementos químicos utilizados na dopagem dos cristais das junções P e N. Enquanto os diodos e transistores são formados normalmente por silício e germânio, os LEDs possuem os elementos, índio, gálio, arsênio, fósforo, nitrogênio, todos combinados de forma a potencializar os efeitos do processo de eletroluminescência.

O principal componente do LED é o *chip* semicondutor como mostra a Figura 2.2, ele está localizado na camada do tipo P, portanto para haver recombinações entre elétrons e lacunas é necessário conectar o polo positivo de uma fonte de energia CC externa no anodo e o polo negativo ao catodo do LED. O processo de emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia é chamado eletroluminescência.

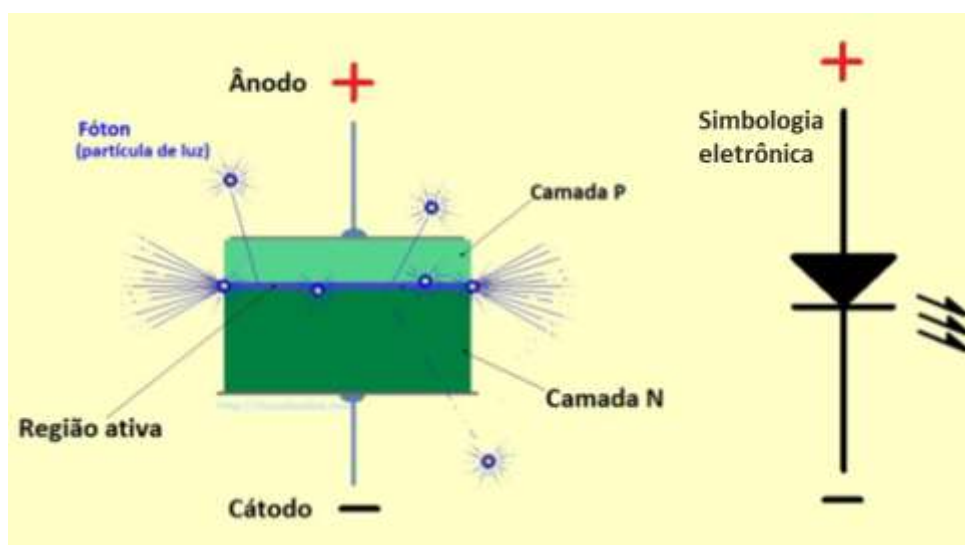
Figura 2.2 – Chip semiconductor de um LED



Fonte: Adaptado de Conex led (2018).

Como todo diodo, o LED é formado por uma junção de cristais, elementos químicos dopados do tipo P e N, que quando polarizado diretamente dentro da estrutura cristalina e próximo à junção, ou seja, na camada ativa (barreira de potencial), ocorrem recombinações entre elétrons (“-”) e lacunas (“+”). Estas recombinações exigem que a energia possuída pelos elétrons seja liberada na forma de calor ou fótons de luz, como mostra a Figura 2.3.

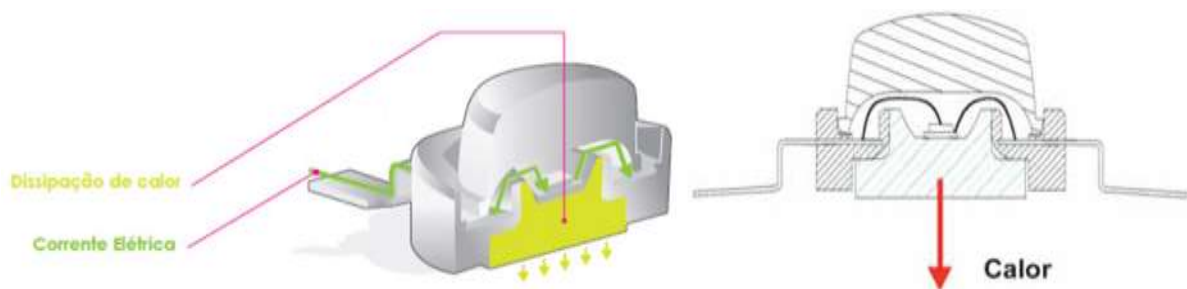
Figura 2.3 – Estrutura básica do LED



Fonte: Adaptado de Pizutti (2018).

O LED libera potência dissipada em forma de calor, por este motivo é necessário a utilização de dissipadores térmicos afim de que os mesmos operem dentro dos limites de temperatura de junção (T_j) especificados pelo fabricante. A Figura 2.4 caracteriza um LED de alta potência que possui caminhos térmicos e elétricos distintos, com retirada de calor realizada por meio do acoplamento de um dissipador térmico à sua base, Scopacasa (2008).

Figura 2.4 – Dissipação de calor do LED



Fonte: Adaptado de Conex led (2018) e Scopacasa (2008).

A temperatura de junção de um LED pode ser calculada a partir do somatório de temperaturas ambiente, com o produto da resistência térmica de junção com a potência elétrica dissipada conforme equação 2.1.

$$T_j = T_A + (R_{th}P_d) \quad 2.1$$

Onde:

- T_j é a temperatura de junção do semicondutor LED em ($^{\circ}\text{C}$);
- T_A é a temperatura ambiente no qual o LED está incorporado em ($^{\circ}\text{C}$);
- R_{th} é a resistência térmica da junção na região ativa com o ambiente em ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$);
- P_d é a potência elétrica média dissipada no LED (W).

É importante controlar o projeto térmico de sistemas eletrônicos, para que as temperaturas máximas de operação nominal não sejam excedidas nos piores casos de ambiente e carga, e que as variações de temperatura dentro do sistema não sejam severas. As razões são que altas temperaturas podem acelerar alguns modos de falha em componentes marginalmente defeituosos, e o ciclo de temperatura entre valores ambientais e altos pode causar fadiga térmica de ligações e estruturas de componentes, particularmente se houver altos gradientes de temperatura locais. A temperatura máxima gerada dentro de um dispositivo depende da carga elétrica e da temperatura ambiente local, bem como da resistência térmica entre a parte ativa do dispositivo e o ambiente externo (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 247).

Portanto, se a temperatura de junção (T_j) do LED não for respeitada conforme informado pelo fabricante, a vida útil do LED é diretamente impactada.

2.3 REFERÊNCIAS NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA

As lâmpadas incandescentes e LED tem suas vidas determinadas por meio de referências normativas. Para lâmpadas incandescentes a norma que trata dos ensaios de vida é a NBR 14671, para as lâmpadas LED os ensaios são determinados pela portaria do INMETRO n° 389.

2.3.1 Lâmpada incandescente e a norma NBR 14671

A norma NBR 14671 determina que a lâmpada incandescente deve ter uma vida nominal de 750 horas para modelos 127V e 1000 horas para os modelos 220V. A norma prevê a realização de ensaios acelerados de vida conforme equação 2.2.

$$\frac{L_0}{L} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^n \quad 2.2$$

Onde:

- L_0 é a vida nominal equivalente de projeto;
- L é a vida na tensão elétrica aplicada ao teste;
- U_0 é a tensão elétrica nominal de projeto;
- U é a tensão elétrica aplicada ao teste;

- n vale 13 para lâmpadas com bulbo sob vácuo e 14 para lâmpadas com enchimento a gás.

O ciclo do ensaio é definido como, as lâmpadas devem ser desligadas a cada 24 horas em um intervalo de 15 minutos em uma tensão de ensaio de 110% da nominal.

A norma NBR 14671 traz também as variabilidades existentes na tensão elétrica de alimentação e o quão isso afeta as lâmpadas incandescentes. Portanto, para cada variação da tensão elétrica as características elétricas e fotométricas são impactadas como mostram as equações, 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6.

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1,54} \quad 2.3$$

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{3,38} \quad 2.4$$

$$\frac{LPW}{LPW_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{1,84} \quad 2.5$$

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0,424} \quad 2.6$$

Onde:

- P é potência nominal na tensão elétrica aplicada ao teste;
- P_0 é potência nominal de projeto;
- ϕ é o fluxo luminoso na tensão elétrica aplicada ao teste;
- ϕ_0 é o fluxo luminoso nominal de projeto;
- LPW é a eficiência luminosa na tensão elétrica aplicada ao teste;
- LPW_0 é a eficiência luminosa na tensão nominal de projeto;
- T é a temperatura do filamento na tensão elétrica aplicada ao teste;
- T_0 é a temperatura do filamento nominal de projeto.

Além das características elétricas e fotométricas, a vida da lâmpada incandescente também está intimamente ligada com a tensão de alimentação da rede elétrica conforme equação 2.1.

O ensaio de vida conforme norma NBR 14671, finaliza quando as lâmpadas atingem 125% da vida nominal, ou seu valor equivalente para as tensões elétricas aplicadas ao teste. Para efeito de critério de aprovação, a norma define que as lâmpadas sob teste não conformes são as que não atendem os requisitos da vida: “as lâmpadas, individualmente, devem ter uma vida não inferior a 70% da vida nominal”; “a manutenção do fluxo luminoso de lâmpadas individuais, a 75% da vida nominal, não deve ser menor que o valor especificado na tabela de características pertinente da lâmpada na sua tensão elétrica de ensaio”. A Figura 2.7 descreve estas características para a lâmpada incandescente 127V e 220V.

Figura 2.7 – Características das lâmpadas incandescentes conforme NBR 14671

Tensão Elétrica V		Potência Nominal W
127		15
Potência máxima	W	16,1
Fluxo luminoso nominal	lm	112
Fluxo luminoso inicial mínimo		104
Manutenção do fluxo luminoso	%	72
Vida nominal	h	750
Vida individual mínima		525

Tensão Elétrica V		Potência Nominal W
220		15
Potência máxima	W	16,1
Fluxo luminoso nominal	lm	110
Fluxo luminoso inicial mínimo		102
Manutenção do fluxo luminoso	%	72
Vida nominal	h	1000
Vida individual mínima		700

Fonte: Adaptado da NBR 14671.

A manutenção do fluxo luminoso, como resultado de característica de degradação da lâmpada incandescente, não é objeto de estudo deste trabalho.

2.3.2 Lâmpada LED e a portaria 389 do INMETRO

A portaria 389 do INMETRO determina que a lâmpada LED deve ter uma vida mínima de até 15.000 horas para lâmpadas decorativas com potências elétricas inferiores a 10W e 25.000 horas para os demais tipos, com manutenção do fluxo luminoso em 70% (L70). Isso significa que é permitido uma degradação de até 30% do fluxo luminoso medido inicialmente, no início da vida. As lâmpadas LED não estão sujeitas a falha súbita, mas normalmente diminuem o fluxo luminoso ao longo do tempo, de uma forma gradual, sendo esta a principal característica de final de vida útil da mesma. No entanto, o dispositivo eletrônico de controle incorporado na lâmpada LED pode apresentar uma falha súbita.

A portaria 389 do INMETRO descreve que a lâmpada LED é definida como sendo aquela com dispositivo de controle incorporado em uma unidade que não pode ser desmontada sem ser permanentemente danificada. O dispositivo de controle deve ser ensaiado como parte de uma lâmpada LED completa, portanto o ensaio de manutenção do fluxo luminoso (lúmen) e definição da vida nominal das lâmpadas LED decorativas com potência menor que 10W e vida nominal declarada L70 de 15000 horas pode ser conduzida da seguinte maneira:

- Manutenção do fluxo luminoso fase 1: Ensaio em 3000 horas de funcionamento contínuo, na tensão nominal (127V em caso de bivolt), em caso de dados de corrente e temperatura medidos nos ensaios referente a norma IESNA LM80 e ISTMT aprovados. No final do teste a lâmpada deve atender o fluxo luminoso mínimo de 93,1% para 3000 horas;
- Manutenção do fluxo luminoso fase 2: Ensaio inicial em 3000 horas e 6000 horas para o fabricante que não possui os dados da IESNA LM80. No final do teste a lâmpada deve atender o fluxo luminoso mínimo de 93,1% para 3000 horas e 86,7% para 6000 horas;
- Ensaios de resistência de ciclos de choque térmico entre -10°C por 1 hora e +50°C por 1 hora, com tempo de transferência dos extremos de temperatura de no máximo 2 minutos, e em seguida, ensaio de ciclos funcionais (comutação da fonte de tensão) em 25°C sendo ligado na tensão de ensaio por 2 minutos e desligado por 2 minutos. Ao final de

cada ensaio, de ciclos térmicos e ciclos funcionais, a lâmpada deve operar e permanecer acesa por 15 minutos com fluxo luminoso mínimo de 80%.

O anexo A da portaria 389 do INMETRO, método de medição do fluxo luminoso dos LEDs, descreve um resumo do ensaio referente ao procedimento de teste LM80 da IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*), onde o mesmo deve ser realizado por um laboratório acreditado. O ensaio é realizado em no mínimo 25 unidades de LED e/ou 10 unidades de módulo e os resultados dos mesmos são registrados no relatório a ser apresentado no memorial descritivo.

A LM-80-08 é um procedimento de teste para LEDs e módulos de LEDs e não considera componentes ópticos, térmicos e controladores. Visa a obtenção de informações sobre manutenção de fluxo luminoso e alteração da cromaticidade com o tempo através de medições em pelo menos 6000 horas de vida, em intervalos de 1000 horas. Aplica-se o método em no mínimo três condições de temperatura (55°C, 85°C e outra especificada pelo fabricante do LED) (IWASHITA, 2015).

O que deve ser analisado em um relatório da LM-80 é se o resultado de depreciação deste LED em conjunto com a temperatura em que este LED estará operando dentro de uma lâmpada ou luminária será adequada ou não para a vida desejada. E então estabelecer a vida do produto através de extrapolações conforme a publicação TM-21-11 (IWASHITA, 2015).

O anexo B da portaria 389 do INMETRO, descreve o método de medição de temperatura *In Situ* ISTMT (*In Situ Temperature Measurement Test*) que segue a norma ANSI / UL 1993-1999 – *Standard for Self-Ballasted Lamps and Lamp Adapters*. Ele inclui a adição de um termopar ligado aos LEDs, módulos ou matrizes usadas na lâmpada LED. O objetivo principal é estimar a temperatura de junção do LED (T_j) por meio de vários pontos de medição de temperatura TMP (*Temperature Measure Points*), como temperatura da região da junção de soldagem com a placa eletrônica (T_s), temperatura de encapsulamento (T_c) ou temperatura dos módulos de LED (T_b). Respectivamente estes locais servem para a mesma função: correlacionar à temperatura externa com a temperatura da junção do LED que é crítica para a determinação da manutenção do fluxo luminoso.

Além dos ensaios de manutenção do fluxo luminoso por meio dos procedimentos LM-80 e ISTMT dos LEDs e módulos de LEDs, a portaria 389 do

INMETRO determina também a avaliação da degradação dos capacitores eletrolíticos que fazem parte do dispositivo de controle (circuito eletrônico interno) incorporado à lâmpada LED. A portaria 389 do INMETRO refere-se norma IEC TR 62380 para a realização dos ensaios acelerados destes capacitores, onde a mesma propõe um modelo universal para previsão de confiabilidade de componentes eletrônicos, PCBs (*Printed Circuit Boards*) e equipamentos. A proposta sugere que o tempo de vida do capacitor eletrolítico pode ser definido conforme equação 2.7, porém alguns fabricantes de capacitores informam fórmulas específicas para o cálculo de vida do capacitor eletrolítico, derivadas da norma IEC TR 62380.

$$LT_{CAP} = t_{TQ} \times 2^{\frac{[(T_M+5)-T_{CP}]}{10}} \quad 2.7$$

Onde:

- LT_{CAP} é a vida do capacitor eletrolítico em horas ou o tempo no qual o capacitor deve ter para atingir o mesmo ou o maior valor de tempo da vida em horas do LED avaliado;
- t_{TQ} é o tempo do teste de qualificação, ou o tempo que o capacitor leva para se degradar, nas condições de ensaio, para que a intensidade luminosa do LED reduza a 90% do seu valor inicial;
- T_M é a temperatura máxima da categoria climática do capacitor, normalmente descrito no corpo do componente, dado de fabricante;
- T_{CP} é a temperatura medida na carcaça do capacitor quando este estiver operando em sua condição normal de funcionamento no interior da lâmpada e na temperatura ambiente de ensaio.

O ensaio é realizado em três temperaturas ambientes distintas e superiores às declaradas em T_{CP} (descritos na carcaça do capacitor ou informado na folha de dados do fabricante). As temperaturas de testes definidas na portaria 389 do INMETRO são, 180°C (453,15 K), 170°C (443,15 K), 160°C (433,15 K) com apenas uma amostra igualmente distinta para cada ensaio. O ensaio é realizado com o capacitor eletrolítico retirado da placa eletrônica, porém com as conexões elétricas

mantidas no dispositivo de controle, em seguida submetido aos testes funcionais em câmaras térmicas programadas conforme temperaturas ambientes definidas (180°C, 170°C e 160°C). Em todas estas condições de teste, a intensidade luminosa da lâmpada LED é monitorada até atingir 90% de redução comparado à intensidade luminosa medida inicialmente. O tempo t_{TQ} é registrado em todas as temperaturas de teste e após todos os três dados (valores) obtidos de LT_{CAP} , é determinado os coeficientes da função linear usando o método dos mínimos quadrados, no qual a escala em Y (LT_{CAP}) é logarítmica e X (T_C) é a escala linear. Utilizando a equação da reta obtida, o LT_{CAP} é calculado (extrapolado) para a condição de uso (Temperatura de 25°C com potências inferiores a 10W para lâmpadas LED decorativas ou 45°C para as demais lâmpadas LED). Os critérios de aprovação do ensaio são determinados:

- A incerteza relativa ao LT_{CAP} , logo após o cálculo (extrapolação) deverá ser no máximo 10% do valor LT_{CAP} da lâmpada LED especificado pelo fabricante, caso contrário o teste é reprovado;
- Considerando a incerteza relativa, o valor do LT_{CAP} deverá ser igual ou maior que LT_{CAP} da lâmpada LED especificado pelo fabricante, senão o teste é considerado como reprovado.

2.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 2

As lâmpadas incandescentes e LEDs possuem características funcionais distintas e tratativas normativas diferentes para declaração da vida útil. Portanto, estas informações são de suma importância, pois orienta para os tipos de mecanismos de falhas existentes e permite a compreensão das relações de estressamentos físicos envolvidos que fazem a vida útil de cada tipo de lâmpada diminuir. O capítulo 3 descreve todo o referencial teórico da engenharia da confiabilidade e descreve as técnicas de análises de dados de vida (LDA) e ensaios acelerado de vida (QALT) para a determinação das métricas da confiabilidade.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o referencial teórico da engenharia da confiabilidade e descreve as técnicas de análises de dados de vida (LDA) e ensaios acelerados de vida (QALT). Estas técnicas serão utilizadas para a determinação das métricas da confiabilidade de lâmpadas do tipo incandescente e LED, que fazem parte do sistema de iluminação dos refrigeradores.

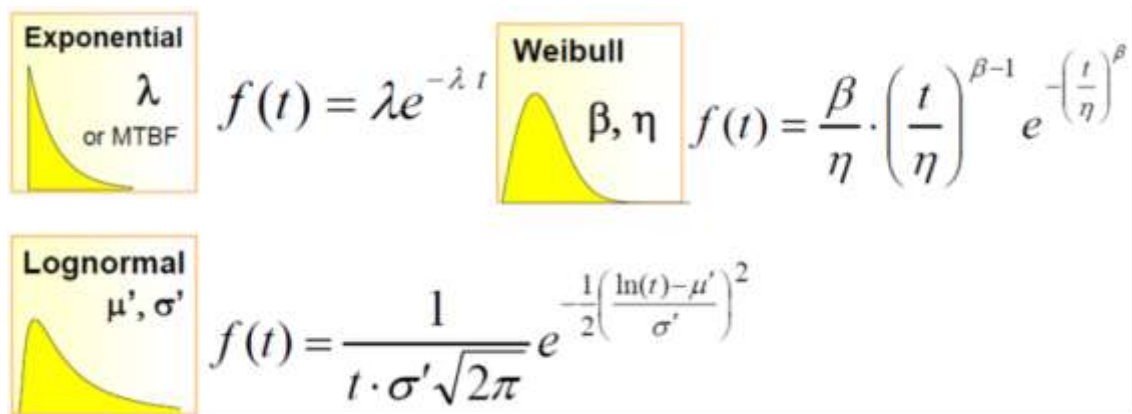
Todo o trabalho é baseado nos conceitos da engenharia da confiabilidade. A norma NBR-5462 (ABNT, 1994) define confiabilidade como sendo “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. Por definição estatística, confiabilidade pode ser descrita como sendo a probabilidade de um produto operar sem falhas em um determinado tempo específico, sob condições de uso conhecidos (regime de funcionamento, temperatura, umidade, pressão, vibração, tensão elétrica, corrente elétrica). As distribuições de probabilidades de vida estão diretamente relacionadas com os modelos de ensaios acelerados de vida, são chamadas de relações vida estresse LSR (*Life Stress Relationship*). A técnica utilizada neste trabalho para estimar a confiabilidade das lâmpadas incandescentes e LED é o QALT (*Quantitative Accelerated Life Test*), ensaio de vida acelerado quantitativo.

3.1 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DE VIDA

A distribuição de probabilidade de vida pode ser também chamada de distribuição de vida ou de função densidade de probabilidade PDF (*Probability Density Function*). Em Reliasoft (2015), “estas distribuições ou funções foram formuladas por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar ou representar matematicamente certos comportamentos”. O comportamento estudado em Engenharia da Confiabilidade é a vida do produto, sistema ou componente.

As principais distribuições de vida estão mostradas na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Principais distribuições de vida



Fonte: Apostila de ensaios acelerados de vida, p. 39 – Spanó (2017).

Para cada uma das distribuições de vida é possível obter a confiabilidade, o tempo médio até a falha e a taxa de falha, dentre outras métricas. Por ser uma distribuição que se adere muito bem a diferentes comportamentos de vida, as equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 descreve as estatísticas obtidas a partir da função densidade de probabilidade de Weibull de 3 parâmetros.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.1$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.2$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.3$$

$$MTTF = \gamma + \eta \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad 3.4$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad 3.5$$

$$R(t'|t) = \frac{R(t+t')}{R(t)} = e^{-\left(\left(\frac{t+t'-\gamma}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)} \quad 3.6$$

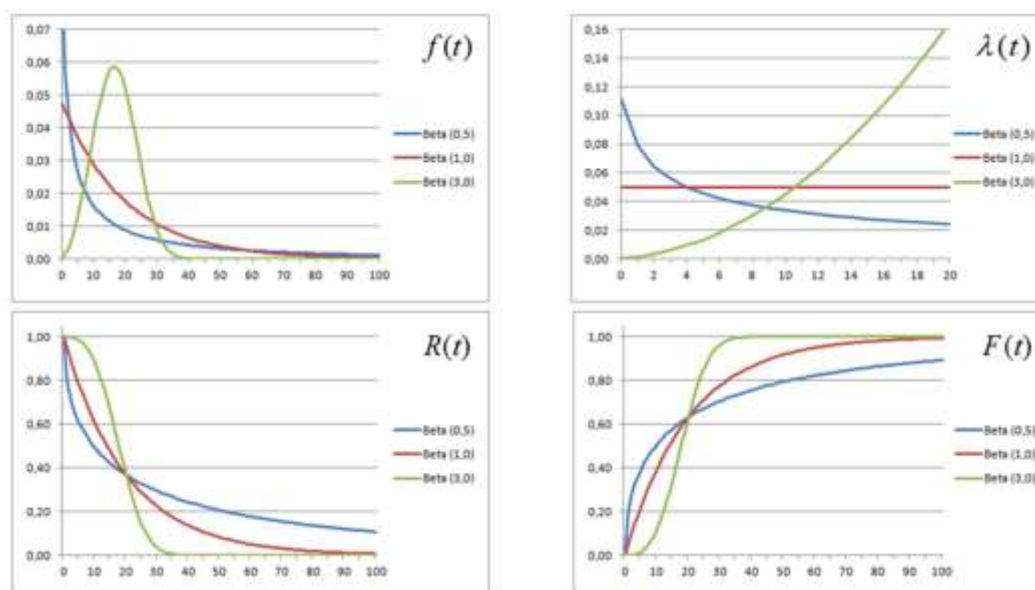
$$Vida BX = 1 - (T_R) = 1 - \left(\gamma + \eta(\ln(R))\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad 3.7$$

Onde:

- $f(t)$ é a função densidade de probabilidade PDF;
- $R(t)$ é a confiabilidade obtida até o tempo t ;
- $F(t)$ é a probabilidade acumulada de falha ou a não confiabilidade CDF até o tempo t ;
- β é o parâmetro de forma ou inclinação (Beta);
- η é o parâmetro de escala ou vida característica (Eta);
- γ é o parâmetro de locação ou localização (Gamma);
- $MTTF$ é o tempo médio até a falha;
- $\lambda(t)$ é a taxa de falha no tempo t ;
- $R(t'|t)$ é a confiabilidade condicional;
- $R(t + t')$ é a confiabilidade para um tempo t' de missão, para amostras que não falharam até o tempo t ;
- T_R é a vida confiável para a confiabilidade R desejada;
- $Vida BX$ é o percentil ou tempo no qual se espera que $X\%$ dos produtos ou itens falhem.

A Figura 3.2 mostra a função densidade de probabilidade (distribuição de dados de vida), a taxa de falha, a confiabilidade e a probabilidade acumulada de falha para diversos valores de parâmetros de forma (Beta).

Figura 3.2 – Efeitos do parâmetro de forma (Beta)



Fonte: Apostila de distribuições aplicada a confiabilidade, p. 20 – Rigoni e Mariano (2016).

Em Rigoni e Mariano (2016), o parâmetro de forma Beta é definido como sendo aquele que dá a aparência da distribuição, ou seja, ao variar o Beta a equação de Weibull poderá representar uma curva típica de falhas prematuras, de falhas aleatórias ou de falhas por desgastes. Teoricamente o Beta pode assumir valores entre zero e infinito, porém na prática é pouco provável encontrar valores menores que 0,2 e maiores que 10.

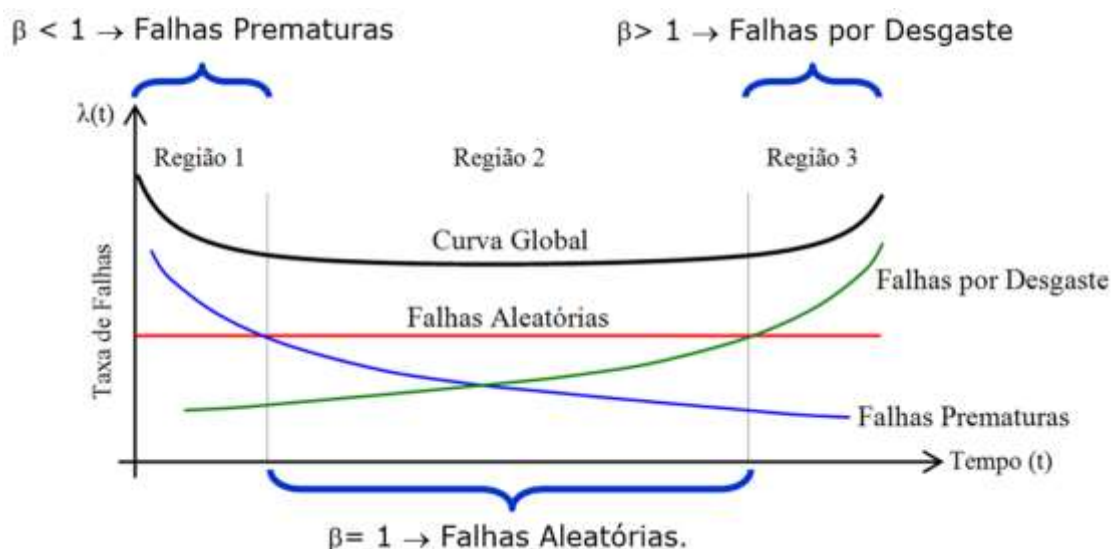
A distribuição de Weibull pode assumir a identidade de outras distribuições estatísticas dependendo do seu valor de Beta.

Como:

- $\beta < 1$ distribuição hiper-exponencial;
- $\beta = 1$ distribuição exponencial;
- $\beta = 2$ distribuição rayleigh ou lognormal;
- $3 < \beta < 4$ distribuição normal;
- $\beta = 3,44$ distribuição normal simétrica.

A curva da banheira mostrada na Figura 3.3 classifica os diferentes valores de Beta com os tipos de comportamento de vida ou taxas de falha.

Figura 3.3 – Curva da banheira



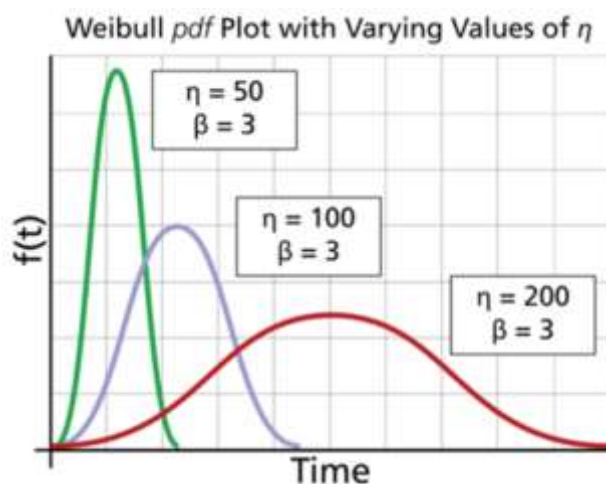
Fonte: Apostila de distribuições aplicada a confiabilidade, p. 20 – Rigoni e Mariano (2016).

A curva global da banheira como mostrada na Figura 3.3 é considerada uma curva hipotética, pois na prática é comum as taxas de falhas assumirem uma única característica, seja ela do tipo prematura, aleatória ou desgaste, salvo as raras exceções de falhas que se manifestam por meio de inúmeras populações diferentes, sendo que, somente a distribuição Weibull mista pode se ajustar a estes tipos de dados e apresentar uma taxa de falha conforme uma curva global.

O parâmetro de escala η é definido como:

A vida característica ou parâmetro de escala é o período para que ocorram cerca de 63% das falhas. Neste período $\eta = (t - t_0)$ e assim a equação da confiabilidade fica reduzida a $R(t) = e^{-1} = 0,37$. O que quer dizer que existe 37% de itens que não falharam até o tempo η , portanto cerca de 63% já falharam. (RIGONI; MARIANO, 2016).

Figura 3.4 – Efeitos do parâmetro de escala (Eta)



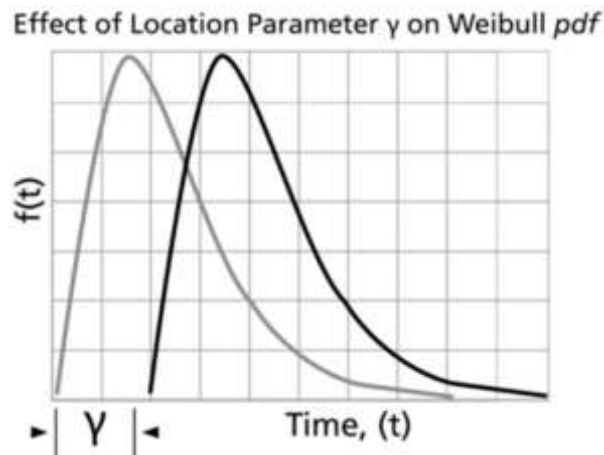
Fonte: Reliasoft (2015).

Em Reliasoft (2015), o parâmetro de localização Gamma pode ser definido como sendo o parâmetro de localização da distribuição Weibull, representa um deslocamento no eixo x, ou seja, altera o início da distribuição para um valor diferente de zero, sendo que:

- $\gamma = 0$ a distribuição inicia com $t=0$ na origem;
- $\gamma > 0$ a distribuição inicia com local γ a direita da origem;
- $\gamma < 0$ a distribuição inicia com local γ a esquerda da origem.

Em ensaios acelerados de vida QALT o parâmetro Gamma é considerado zero.

Figura 3.5 – Efeitos do parâmetro de locação (Gamma)



Fonte: Reliasoft (2018).

O parâmetro de locação Gamma tem a mesma unidade de t , pode ser definido como horas, milhas, ciclos, atuações.

Ainda conforme Reliasoft (2018), em termos práticos, o parâmetro de locação pode ser definido também como:

- O período entre γ até 0 o item é livre de falhas de operação;
- Se γ for positivo indica que as falhas só ocorrerão após esse tempo ou, a confiabilidade neste caso é igual a 100%;
- Se γ for negativo indica que os itens possuem uma confiabilidade menor que 100% para o tempo igual a zero. Isto pode ocorrer devido o método utilizado para registrar o tempo ou por algum modo de falha que ocorre devido ao transporte, degradação do item enquanto no estoque, por questões de manufatura, etc.

Em ensaios acelerados de vida QALT, o parâmetro de locação Gamma é raramente utilizado e por questões práticas pode ser considerado igual a 0.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE DADOS EM ANÁLISES DE VIDA

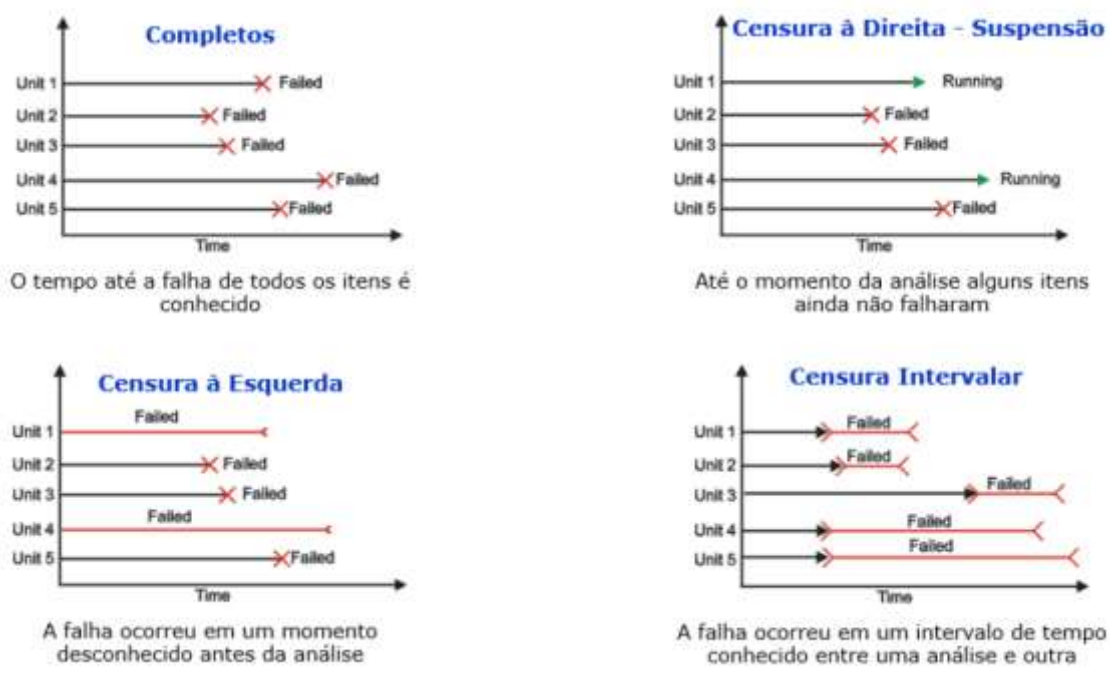
Os dados de vida podem ser classificados como dados completos, aqueles que possuem todas as informações de tempos até a falha ou dados censurados,

onde as informações dos tempos até a falha são desconhecidas até o momento das inspeções realizadas (censura à esquerda) ou as falhas estão concentradas em intervalos ou janelas de tempo entre inspeções (censura intervalar). Quando não há dados de tempos até a falha até o momento da inspeção, os dados são considerados suspensos (censura à direita).

Na análise de dados de vida, os modelos são as distribuições estatísticas e os dados são os dados de vida ou tempo até falha do nosso produto. A precisão de qualquer previsão é diretamente proporcional à qualidade, precisão e integridade dos dados fornecidos. Bons dados, juntamente com a escolha apropriada do modelo, geralmente resultam em boas previsões. Dados ruins ou insuficientes quase sempre resultarão em previsões ruins. Na análise de dados de vida, queremos usar todos os conjuntos de dados disponíveis, que às vezes estão incompletos ou incluem incerteza quanto do momento da ocorrência de uma falha. Os dados de vida podem, portanto, ser separados em dois tipos: dados completos (todas as informações estão disponíveis) ou dados censurados (algumas informações estão faltando), (RELIASOFT, 2015).

A Figura 3.6 esboça graficamente os tipos de dados encontrados em LDA e QALT.

Figura 3.6 – Tipos de dados em LDA e QALT



Dados de tempos até falha podem ser completos ou censurados. Dados completos trazem o tempo exato até a falha de cada unidade testada. Em muitas situações práticas, não se obtêm conjuntos completos de dados em testes acelerados. Dados incompletos são resultantes, por exemplo, de testes em que critérios de ordem prática ou econômica não permitiram rodar o teste até que todas as unidades falhassem. Um conjunto de dados incompletos de tempos até falha é dito censurado. Dados censurados são aqueles para os quais se conhece um limite no tempo até falha, mas não o seu valor exato. O tipo mais frequente de censura é conhecido como “censura à direita”. Em um conjunto de dados censurados à direita, existe uma ou mais unidades para as quais só se conhece um limite inferior para o tempo até falha (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Em muitas situações práticas, análises de confiabilidade não podem ser conduzidas com conjuntos completos de dados. Dados incompletos podem ser resultantes de testes de vida em que: (i) critérios de ordem prática ou econômica não permitiram rodar o teste até que todas as unidades falhassem, (ii) algumas unidades perderam-se ou danificaram-se durante o teste, ou (iii) não foi possível registrar o exato momento de ocorrência da falha nas unidades, mas somente um intervalo de tempo que contém esse momento. Além disso, a análise do conjunto de dados parciais obtidos antes do final do teste pode levar a conclusões seguras sobre a distribuição que caracteriza os tempos até falha da unidade. Nesses casos, o alargamento da amostra não seria necessário, e o teste seria interrompido. Um conjunto de dados incompletos de tempos até falha é dito censurado ou truncado. As circunstâncias que resultam em dados censurados, exemplificadas anteriormente, permitem concluir que, em teste de vida de componentes, a censura pode ou não ser planejada (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Deve-se escolher durante o planejamento dos experimentos de LDA e QALT, entre duas classificações de censura:

- Censura do tipo 1: a análise é realizada em períodos de tempo pré-definidos. O tempo em que cada item fica sob análise é fixo, enquanto que o número de unidades que falham neste período é indiferente, portanto é aleatório;
- Censura do tipo 2: a análise termina após ter ocorrido um determinado número de falhas pré-definidas. O tempo da análise é indiferente, portanto é aleatório.

Há a possibilidade de uma terceira classificação ser considerada, a censura do tipo aleatória, onde o item em análise é retirado no decorrer do ensaio sem ter

atingido o modo de falha esperado ou por uma razão diferente da que o experimento estava propondo a estudar.

3.3 ENSAIOS ACELERADOS DE VIDA

Os dados de tempos até a falha ou dados de vida como visto até o momento diz respeito aos produtos, sistemas ou componentes em condições de operações normais de uso, ou seja, nas condições funcionais e ambientais ao qual o mesmo foi desenvolvido e projetado para operar. Na prática fazer a coleta destes dados é bastante difícil, pois os produtos, sistemas ou componentes levam longos períodos de tempo para falhar, muitas vezes estes dados não são coletados por desconhecimento da importância dos conceitos de engenharia da confiabilidade, quando os dados existem, há dúvidas na maneira em que estes foram coletados, se estão poluídos ou não. Do ponto de vista de desenvolvimento de produto, o curto período de tempo entre a fase de projeto e a liberação para produção, inviabiliza a utilização de LDA para se obter a confiabilidade, portanto os ensaios acelerados de vida são os mais indicados para tal finalidade.

A norma NBR-5462 (ABNT, 1994) define ensaios acelerados de vida como sendo o “ensaio no qual os níveis das solicitações aplicados são escolhidos de modo a exceder aqueles especificados nas condições de referência, a fim de reduzir o tempo necessário para se observar a reação do item, ou para ampliar esta reação durante um intervalo de tempo. Para ser válido, o ensaio acelerado não deve alterar os modos de panes básicos e os mecanismos de falhas ou suas prevalências relativas”.

Há dois tipos de ensaios acelerados de vida, o qualitativo e o quantitativo.

Onde:

- Qualitativo: Segundo Spanó (2017), os ensaios qualitativos são feitos em pequenas quantidades de amostras de um componente, sistema ou produto, com altos níveis de estressamento, os testes geralmente são chamados de teste de tortura, teste do elefante, HALT, shake & bake e tem como objetivo revelar informações de falhas ocultas para que possam

ser tratadas e corrigidas, portanto os dados obtidos destes ensaios não podem ser utilizados para realizar previsões de confiabilidade, além de não ser possível afirmar se os modos de falhas identificados serão os mesmos da condição normal de uso;

- Quantitativo: Ainda segundo Spanó (2017), os testes quantitativos de vida são delineados para fornecer informações sobre a confiabilidade do componente, sistema ou produto, por meio da obtenção dos dados de vida durante os ensaios acelerados. Os ensaios quantitativos possibilitam a quantificação da vida característica em um tempo ligeiramente menor, portanto os tempos até a falha serão menores do que na condição normal de uso.

O foco deste trabalho se concentra nos ensaios quantitativos, pois o interesse é descobrir as métricas da confiabilidade, como MTTF, vida B10, vida B50, vida B90, taxa de falha, as curvas da PDF e CDF.

3.3.1 Aceleração por uso contínuo ou taxa de uso

Em Reliasoft (2015), produtos que possuem regimes de funcionamento de forma não contínua, podem ter seus tempos até a falha aceleradas se testadas em condições operacionais contínuas. Se um componente, sistema ou produto qualquer opera por pequenos períodos de tempo todos os dias, pode-se acelerar o seu funcionamento com uma frequência maior ou até mesmo contínuo até o evento da falha, desta forma obtemos a aceleração pela taxa de uso ou pelo uso contínuo, URA (*Usage Rate Acceleration*). Os dados obtidos por meio da aceleração do uso contínuo podem ser analisados pelos mesmos métodos de análise de dados de vida LDA (tempos até a falha).

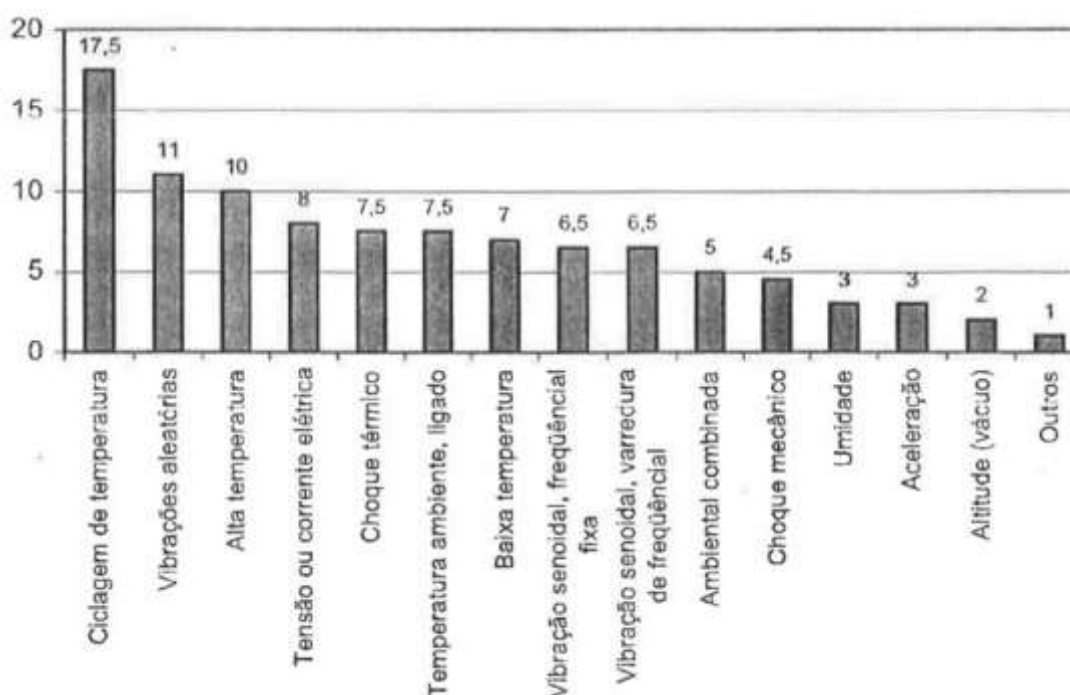
Em Spanó (2017), se um produto opera por 10 horas semanais em média, sabendo-se que se este for testado continuamente por uma semana, logo teremos 168 horas de uso contínuo, portanto tem-se um fator de aceleração possível de 16,8.

3.3.2 Aceleração por sobrecarga

Em Reliasoft (2015), componentes, produtos ou sistemas que possuem altas taxas de uso ou operação contínua, deve ser estressado ou estimulado de forma que exceda as condições normais de uso, portanto os dados de vida obtidos nestas condições (tempos até a falha) são utilizados para extrapolação nas condições de uso. Os estímulos ou estresses normalmente utilizados são temperatura, umidade, vibração, pressão, tensão, estes podem ser utilizados isoladamente ou combinados entre si afim de acelerar os mecanismos de falhas latente.

Em Pallerosi (2007), para se obter a aceleração da vida do produto, sistema ou componente, é necessário conhecer os principais meios de estressamento e sua ocorrência (%), como mostra Figura 3.7.

Figura 3.7 – Tipos de estressamento



Fonte: Pallerosi (2007).

Onde:

- Ciclagem de temperatura: é o meio mais frequente, principalmente para produtos eletroeletrônicos, efetuada em fornos com temperatura controlada e programada;
- Vibrações aleatórias: é efetuada por meio de um gerador de frequências, com um programador alimentado por meio aleatório. Em alguns casos, são gravadas em campo as vibrações a serem induzidas e a seguir reproduzidas em laboratório;
- Alta temperatura: o produto é mantido durante certo tempo em temperaturas constantes, pelo menos 20 % acima do uso normal;
- Tensão (ou corrente) elétrica: é alimentada por uma fonte de tensão (ou corrente) variável, acima (ou abaixo) do uso normal;
- Choque térmico: é induzida uma variação brusca de temperatura, geralmente por alimentação de ar quente e frio, sobre os componentes dentro de uma câmara de ensaio;
- Temperatura ambiente, ligado (em funcionamento): a aceleração é na duração, para componentes que atuam durante curtos períodos de vida, e o teste é realizado em longos períodos;
- Baixa temperatura: é realizado em câmaras especiais, principalmente para produtos aeroespaciais. Em alguns casos é aplicado nitrogênio líquido;
- Vibração senoidal, frequência fixa: o vibrador (Shacker) é mantido na frequência especificada durante todo o teste;
- Vibração senoidal, com varredura de frequência: o vibrador gera uma gama de frequências, de um valor mínimo a um valor máximo, durante um dado intervalo de tempo, geralmente de modo cíclico;
- Ambiental combinada: o produto sofre mais de um meio de estressamento, por exemplo, temperatura - vibração, temperatura - umidade, etc;
- Choque mecânico: visa detectar danos por manuseio (transporte, etc.) ou operações críticas durante seu uso (veículos, armas);

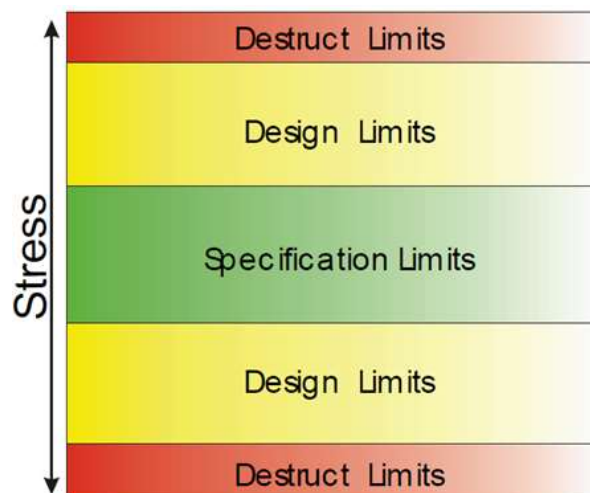
- Umidade: teste realizado em câmaras especiais, frequentemente com ambiente contaminado (névoa salina, etc.) para acelerar o estressamento;
- Aceleração: o produto recebe acelerações e desacelerações programadas, para induzir tensões mecânicas que provocam fadiga estrutural ou localizada;
- Altitude (vácuo): realizado em câmaras especiais, principalmente para componentes utilizados em equipamentos aeroespaciais.

Em Spanó (2017), os ensaios acelerados quantitativos podem ser delineados elevando-se os fatores de estressamentos ou combinações destes, a fim de acelerar os mecanismos de falha (estimula-los para que falhem rapidamente).

3.3.3 Níveis de estressamento

Em Reliasoft (2015) e Spanó (2017), os níveis de estressamento para o ensaio acelerado de vida devem ser escolhidos de forma a não introduzir modos de falha que jamais ocorreriam nas condições normais de uso, portanto o estresse deve ser escolhido afim de acelerar o modo de falha que se deseja estudar. Normalmente, os níveis de estresse permanecem fora dos limites de especificação, porém dentro dos limites de projeto como mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Níveis de estresse



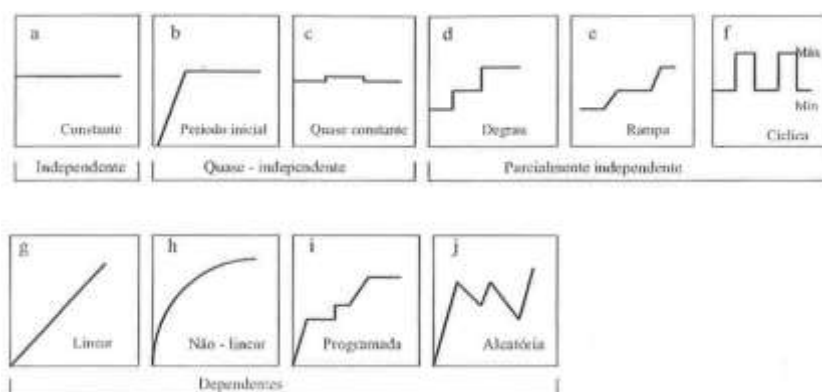
Fonte: Spanó (2017).

Em Reliasoft (2015) a escolha de níveis de estresse é extremamente importante do ponto de vista dos mecanismos de falhas que poderão ser encontrados durante o teste, portanto faz-se necessário compreender as características dos materiais no qual o componente, produto ou sistema é constituído para assim identificar os limites e os estímulos mais adequados a serem utilizados no ensaio. Quando os limites ou estresses são desconhecidos, testes qualitativos como HALT ou DOE podem ser realizados para determinar o nível de estresse mais apropriado. Além da seleção adequada do estresse, a aplicação dos estímulos deve ser realizada de alguma maneira lógica, controlada e quantificável. A medida que o estresse usado no ensaio acelerado se torna maior, a duração necessária do teste diminui, ou seja, as falhas ocorrerão mais rapidamente, porém a incerteza envolvida na extrapolação aumenta. Os intervalos de confiança, para estas condições, fornecem as medidas dessas incertezas na extrapolação.

3.3.4 Tipos de carregamentos de estresse

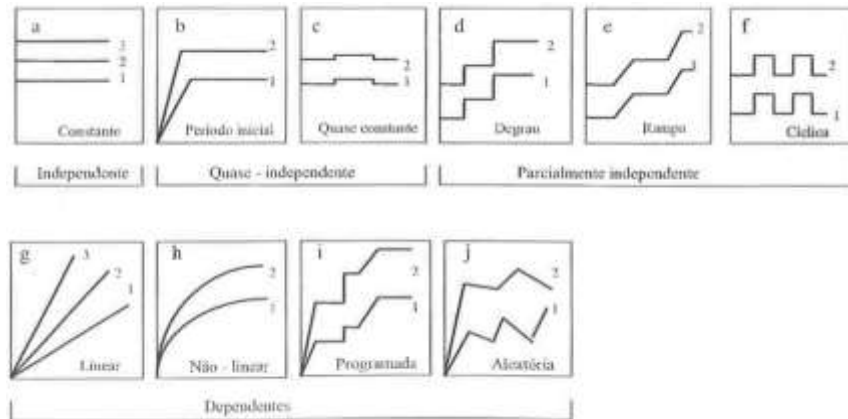
Em Pallerosi (2007), os ensaios acelerados são classificados quanto a sua duração (tempo, ciclos, quilômetros, etc), como mostra as Figuras 3.9 e 3.10.

Figura 3.9 – Classificação dos ensaios acelerados quanto a duração, para um único nível de estressamento



Fonte: Pallerosi (2007).

Figura 3.10 – Classificação dos ensaios acelerados quanto a duração, com múltiplos níveis de estressamento



Fonte: Pallerosi (2007).

Onde:

- Independente: cada amostra é submetida a um valor constante do estressamento até o final do ensaio;
- Quase independente: cada amostra é submetida a um período inicial de estressamento, após o qual o estressamento é mantido constante até o término do ensaio, ou então existe pouca variação do mesmo;
- Parcialmente independente: cada amostra é submetida a valores constantes do estressamento em definidos períodos do ensaio, de forma progressiva, com acréscimo em degraus, rampas ou variações cíclicas. A vantagem da utilização de degraus ou rampas é provocar quantidades crescentes de falhas, no que reduz o tempo dos ensaios, porém a principal desvantagem é que nem sempre ela corresponde ao modelo de uso real;
- Dependente: durante todo o ensaio o estressamento é variável, nas formas linear, não-linear, programada ou aleatório.

Em Reliasoft (2015), os carregamentos de estresse independentes do tempo oferecem muitas vantagens sobre os carregamentos dependentes do tempo.

Onde:

- Presume-se que a maioria dos produtos opere sob um esforço constante nas condições normais de uso;
- É muito mais fácil executar um teste de esforço constante (por exemplo, aquele em que a câmara é mantida a uma temperatura única);
- É muito mais fácil quantificar um teste de esforço constante.
- Existem modelos para análise de dados, são amplamente divulgados e são verificados empiricamente;
- A extrapolação de um teste de estresse constante bem executado é mais preciso do que a extrapolação de um teste de estresse dependente do tempo.

3.3.5 Relações vida estresse constantes no tempo (independentes)

A relação ou modelo LSR (*Life Stress Relationship*) descreve que a vida está em função de um estressamento e matematicamente assume a forma (curvas de estressamento) exponencial e de potência como mostram as equações 3.8 e 3.9 respectivamente.

$$L(V) = A_{ep} e^{B_{md}V} \quad 3.8$$

$$L(V) = A_{ep} V^{B_{md}} \quad 3.9$$

Em O'Connor e Kleyner (2012), na relação vida estresse do tipo exponencial e de potência, A_{ep} é uma constante empírica e B_{md} pode ser uma função que descreve o modelo. Para relação exponencial, os mecanismos de falha dos componentes eletrônicos geralmente seguem essa relação vida estresse durante a maior parte de suas vidas dependendo da temperatura, alguns outros materiais seguem esse tipo de relação em função do intemperismo. Para a relação de potência, os componentes eletrônicos também seguem essa relação vida estresse

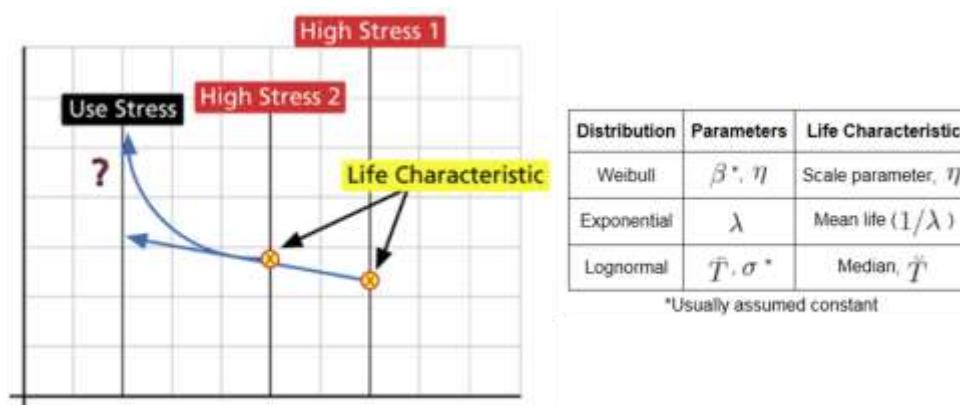
durante a vida dependendo do nível do estresse, alguns outros materiais seguem esse tipo de relação em função da fluência mecânica.

Em Spanó (2017), se $B_{md} = 1$ na relação de potência, o modelo se transforma em uma relação linear como mostra a equação 3.10.

$$L(V) = A_{ep}V \quad 3.10$$

Em Reliasoft (2015), no que diz respeito a extrapolação dos dados de vida para as condições reais de uso, são necessários no mínimo dois pontos, ou seja, dois níveis de estresse para que o modelo LSR escolhido se adapte aos dados da distribuição de vida. Quanto mais pontos ou níveis de estresse o ensaio tiver, mais próximo e adaptado o modelo LSR estará aos dados da distribuição de vida como mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Extrapolação dos dados



Fonte: Adaptado Reliasoft (2015).

A característica de vida como mostrada na Figura 3.11, pode ser qualquer medida de vida, como o parâmetro de escala, vida média, vida mediana. Essa característica de vida é expressa como uma função do estresse. Dependendo da distribuição de vida subjacente assumida, diferentes características de vida são consideradas, Reliasoft (2015).

Relação LSR de Arrhenius

Em Reliasoft (2015), o modelo LSR Arrhenius é amplamente utilizado quando o estímulo ou variável de estresse é a temperatura. O modelo é derivado da equação da taxa de reação de Arrhenius proposta pelo químico físico sueco Svandte Arrhenius em 1887. Sua formulação original é mostrada equação 3.11.

$$R(T) = Ae^{-\frac{Ea}{kT}} \quad 3.11$$

Onde:

- $R(T)$ é a velocidade da reação em função da temperatura T ;
- A é uma constante não térmica;
- Ea é a energia de ativação;
- k é a constante de Boltzmann's ($8,617385 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$);
- T é a temperatura absoluta em Kelvin.

“A energia de ativação Ea representa a reação a energia que a molécula deve ter para participar da reação. Em outras palavras, a energia de ativação mensura o efeito que a temperatura teve na reação” (RELIASOFT, 2015).

Como a energia de ativação mede o efeito que a temperatura tem na reação, o ensaio acelerado de vida, com os níveis de estressamento aplicados, pode representar diretamente o efeito da temperatura na vida, portanto pode ser determinado a partir dos dados de vida encontrados durante estes mesmos ensaios.

O modelo LSR de Arrhenius pode ser reescrito como sendo uma relação exponencial e que para qualquer estressamento, a vida característica de interesse estará em função da vida pelo estressamento $L(V)$, assumindo assim que a vida é proporcional ao inverso da taxa de reação do processo (SPANÓ, 2017). A equação 3.12 mostra a equação geral do modelo LSR de Arrhenius.

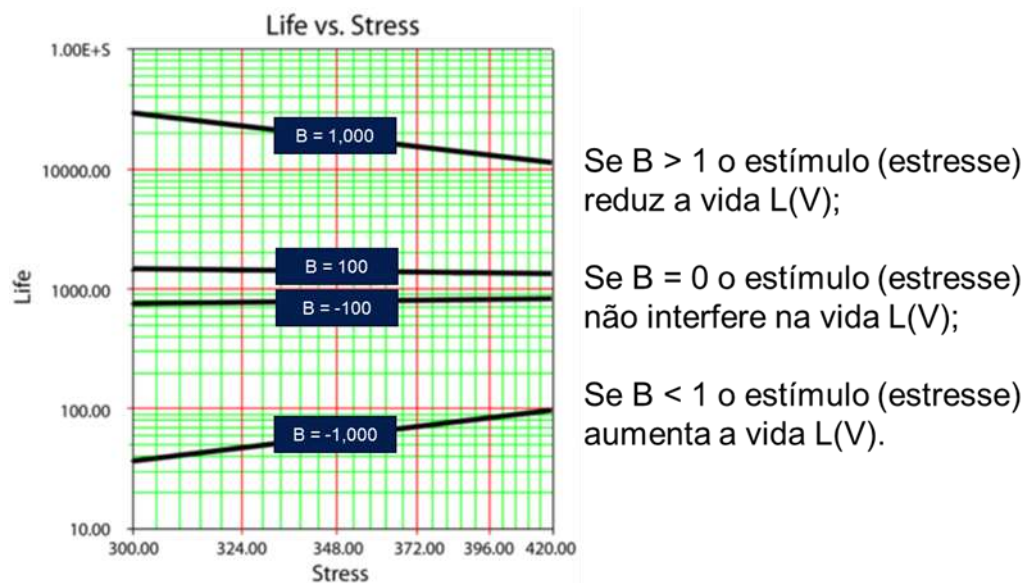
$$L(V) = C e^{\frac{B}{V}} \quad 3.12$$

Onde:

- $L(V)$ é uma medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função do nível de estressamento;
- V é o nível do estressamento, temperatura em Kelvin, em valores unitários e positivos.
- C é uma constante de posição não térmica do material a ser determinado pelos dados ($C > 0$);
- B é o fator de estressamento, mede o efeito que a temperatura tem sobre a vida e pode ser determinado diretamente sobre a relação da energia de ativação com a constante de Boltzmann's ($B = \frac{Ea}{k}$).

Os efeitos do fator de estressamento B pode ser melhor compreendido na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Comportamentos do parâmetro B



Fonte: Adaptado Spanó (2017) e Reliasoft (2015).

O fator de aceleração pode ser descrito como mostra a equação 3.13.

$$AF = e^{\left(\frac{B}{V_U} - \frac{B}{V_A}\right)} \quad 3.13$$

Onde:

- AF é o fator de aceleração do modelo;
- V_U é o nível de estressamento na condição de uso;
- V_A é o nível de estressamento na condição acelerada.

O modelo de vida do estressamento, para uma PDF (função densidade de probabilidade) de Weibull, pode ser reformulada como mostra a equação 3.14, ou seja, a vida característica η original da distribuição de vida Weibull é substituída pelo modelo de estressamento Arrhenius, portanto a distribuição de vida não está mais somente em função do tempo, mas também pelo nível do estímulo (estressamento).

$$f(t, V) = \frac{\beta}{C e^{\bar{V}}} \left(\frac{t}{C e^{\bar{V}}}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{C e^{\bar{V}}}\right)^{\beta}} \quad 3.14$$

A partir da equação 3.14, todas as métricas da engenharia da confiabilidade podem ser obtidas, como a confiabilidade $R(t)$, a CDF (probabilidade acumulada de falha) $F(t)$, a taxa de falha $\lambda(t)$, o tempo médio até a falha $MTTF$, dentre outros.

Relação LSR IPL (Inverse Power Law) – Potência Inversa

Em Spanó (2017), o modelo LSR IPL é “normalmente utilizado para analisar dados obtidos em testes onde os fatores de estressamentos (ou estímulos) são, em seu princípio físico, não térmicos”. Sua formulação é mostrada na equação 3.15.

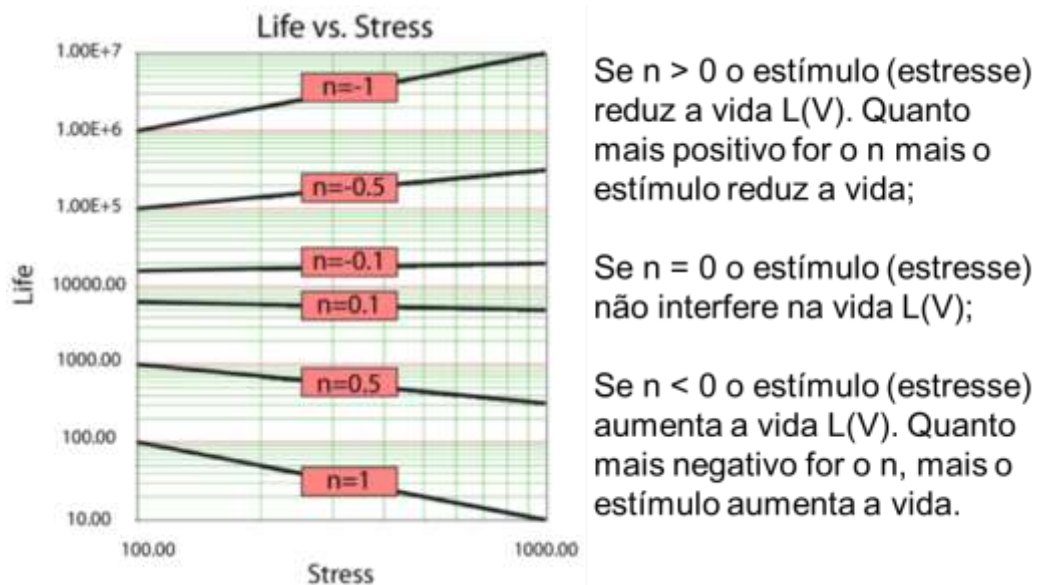
$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad 3.15$$

Onde:

- $L(V)$ é uma medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função do nível de estresse;
- V é o nível do estresse, tensão elétrica, corrente elétrica, pressão (força), em valores unitários e positivos;
- K é uma constante de posição a ser determinado pelos dados;
- n é o fator de estresse, mede o efeito que o estímulo tem sobre a vida.

Os efeitos do fator de estresse n pode ser melhor compreendido na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Comportamentos do parâmetro n



Fonte: Adaptado Reliasoft (2015).

O fator de aceleração pode ser descrito como mostra a equação 3.16.

$$AF = \left(\frac{V_A}{V_U} \right)^n \quad 3.16$$

Onde:

- AF é o fator de aceleração do modelo;
- V_U é o nível de estressamento na condição de uso;
- V_A é o nível de estressamento na condição acelerada.

O modelo de vida do estressamento, para uma PDF (função densidade de probabilidade) de Weibull, pode ser reformulada como mostra a equação 3.17, ou seja, a vida característica η original da distribuição de vida Weibull é substituída pelo modelo de estressamento IPL, portanto a distribuição de vida não está mais somente em função do tempo, mas também pelo nível do estímulo (estressamento).

$$f(t, V) = \beta KV^n ((KV^n)(t))^{\beta-1} e^{-((KV^n)(t))^\beta} \quad 3.17$$

A partir da equação 3.17, todas as métricas da engenharia da confiabilidade podem ser obtidas, como a confiabilidade $R(t)$, a CDF (probabilidade acumulada de falha) $F(t)$, a taxa de falha $\lambda(t)$, o tempo médio até a falha $MTTF$, dentre outros.

Em Reliasoft (2015), a ciclagem térmica é comumente tratada como um problema de fadiga em ensaios acelerados de vida. Coffin e Manson sugeriram que, ao relacionar (parametrizar) a lei da potência inversa, o número de ciclos térmicos até a falha de um metal pode ser obtido como mostra a equação 3.18.

$$N = \frac{C_{CF}}{(\Delta T)^m} \quad 3.18$$

Onde:

- N é o número de ciclos térmicos até a falha;
- C_{CF} é uma constante, característica do metal a ser determinado pelos dados;
- m é uma constante empírica de fadiga do metal, tem o mesmo efeito do parâmetro n do modelo IPL (*Inverse Power Law*);
- ΔT é a variação da faixa de temperatura $\Delta T = T_{max} - T_{min}$.

O fator de aceleração pode ser reescrito como mostra a equação 3.19.

$$AF = \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_U} \right)^m \quad 3.19$$

Onde:

- AF é o fator de aceleração do modelo;
- ΔT_U é a variação da faixa térmica na condição de uso;
- ΔT_A é a variação da faixa térmica na condição acelerada.

A PDF (função densidade de probabilidade) de Weibull também pode ser reformulada considerando os parâmetros sugeridos por Coffin e Manson como mostra a equação 3.20.

$$f(t, \Delta T) = \frac{\beta(\Delta T)^m}{C_{CF}} \left(\frac{((\Delta T)^m)(t)}{C_{CF}} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{((\Delta T)^m)(t)}{C_{CF}} \right)^\beta} \quad 3.20$$

Ao se tratar de componentes, produtos ou sistemas eletrônicos que fazem uso de soldas estanho-chumbo (*Tin-Lead*) e soldas livre de chumbo (*Lead-Free*), as relações de potência para tratamento de fadigas provocadas por ciclos térmicos ainda não atingiram maturidade científica suficiente que comprove a eficácia de utilização de um modelo Coffin-Manson convencional ou algum outro derivado, como descreve O'Connor e Kleyner (2012).

No caso de fadiga de baixos ciclos, o fator de aceleração é tipicamente aplicado ao número de ciclos térmicos, e não ao tempo de exposição da temperatura. Existem extensões do modelo Coffin-Manson que explicam o efeito da transição de temperatura durante o ciclo térmico (ver Norris e Landzberg, 1969). No entanto, não há evidências conclusivas de que uma transição de temperatura mais rápida tenha um efeito significativo sobre a vida da fadiga das juntas de solda de estanho-chumbo (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 333).

O comportamento mecânico da solda sem chumbo é diferente do estanho-chumbo, incluindo suas propriedades de fadiga. O modelo simplificado isento de chumbo é baseado na equação Coffin Manson de estanho-chumbo com a constante de fadiga $m = 2,6 - 2,7$. No entanto, os fatores de aceleração da solda sem chumbo também são influenciados por outras variáveis além de ΔT , como as temperaturas máxima e mínima do ciclo, tempos de parada (temperaturas máxima e mínima) e até certo ponto a taxa de transição de temperatura, a solda sem chumbo não tem sido estudada por quase tanto tempo quanto a estanho-chumbo, portanto levará tempo até que o conhecimento técnico sobre a solda sem chumbo atinja a maturidade (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 333).

Em Yang (2007), a relação Coffin-Manson assume implicitamente que a vida depende apenas da fadiga provocada pela faixa de temperatura do ciclo térmico. A relação Norris-Landzberg (1969) modifica a relação convencional de Coffin-Manson e propõe que a fadiga também está em função da frequência dos ciclos térmicos e da exposição a alta temperatura como mostrado na equação 3.21.

$$N = X(\Delta T)^{-Y} f^Z e^{\left(\frac{Ea}{kT_{max}}\right)} \quad 3.21$$

Onde:

- N é o número de ciclos térmicos até a falha;
- X , Y e Z são constantes, características do material e devem ser obtidos pelo método de regressão linear (pelos dados);
- ΔT é a variação da faixa de temperatura $\Delta T = T_{max} - T_{min}$;
- f é a frequência da ciclagem térmica, dada e ciclos/hora, ciclos/minuto, ciclos/segundos;
- Ea é a energia de ativação;
- k é a constante de Boltzmann's ($8,617385 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$);
- T_{max} é a temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica.

O fator de aceleração pode ser reescrito como mostra a equação 3.22.

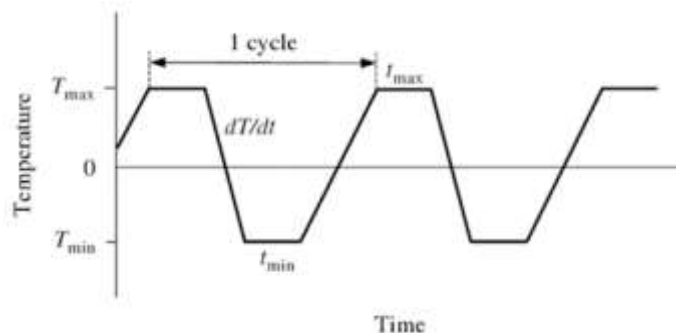
$$AF = \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_U}\right)^Y \left(\frac{f_U}{f_A}\right)^Z e^{\left(\frac{Ea}{k} \left(\frac{1}{T_{max_U}} - \frac{1}{T_{max_A}}\right)\right)} \quad 3.22$$

Onde:

- AF é o fator de aceleração do modelo;
- Y é similar ao parâmetro n do modelo IPL;
- Z é similar ao parâmetro n do modelo IPL;
- ΔT_U é a variação da faixa térmica na condição de uso;
- ΔT_A é a variação da faixa térmica na condição acelerada;
- f_U é a frequência da ciclagem térmica na condição de uso;
- f_A é a frequência da ciclagem térmica na condição acelerada;
- T_{max_U} é a temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica na condição de uso;
- T_{max_A} é a temperatura no limite mais quente da ciclagem térmica na condição acelerada.

Para efeitos de nomenclaturas, a quantidade de ciclos térmicos (N) pode ser reescrita em função do tempo (t), desde que sejam conhecidos os tempos envolvidos durante o ciclo térmico, como mostra a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Perfil do ciclo térmico



Fonte: Yang (2007).

A PDF (função densidade de probabilidade) de Weibull também pode ser reformulada considerando os parâmetros sugeridos por Norris e Landzberg em 1969 como mostra a equação 3.23.

$$f(t, \Delta T) = \frac{\beta}{X(\Delta T)^{-Y} f_Z e^{\left(\frac{Ea}{KT_{max}}\right)}} \left(\frac{t}{X(\Delta T)^{-Y} f_Z e^{\left(\frac{Ea}{KT_{max}}\right)}} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{X(\Delta T)^{-Y} f_Z e^{\left(\frac{Ea}{KT_{max}}\right)}} \right)^\beta} \quad 3.23$$

A partir das equações 3.22 e 3.23 das PDFs (funções densidade de probabilidade) para os modelos Coffin-Manson e Norris-Landzberg, todas as métricas da engenharia da confiabilidade podem ser obtidas, como a confiabilidade $R(t)$, a CDF (probabilidade acumulada de falha) $F(t)$, a taxa de falha $\lambda(t)$, o tempo médio até a falha $MTTF$, dentre outros.

Temperatura – Não térmico (T-NT)

Conforme Spanó (2017), quando os fatores de aceleração são temperatura (V) e um segundo fator, não térmico (U), então os modelos de Arrhenius e de IPL (*Inverse Power Law*) podem ser combinados para permitir criar o modelo Temperatura-Não Térmico. Sua formulação é mostrada na equação 3.24.

$$L(U, V) = \frac{C}{U^n e^{-\frac{B}{V}}} \quad 3.24$$

Onde:

- U é o nível do estressamento não-térmico, tensão elétrica, corrente elétrica, pressão (força), em valores unitários e positivos;
- V é o nível do estressamento térmico, temperatura em Kelvin, em valores unitários e positivos;
- C é uma constante a ser determinada pelos dados;
- n é o fator de estressamento não-térmico, mede o efeito que o estímulo tem sobre a vida, determinado pelos dados;

- B é o fator de estressamento térmico, mede o efeito que a temperatura tem sobre a vida e pode ser determinado diretamente sobre a relação da energia de ativação com a constante de Boltzmann's ($B = \frac{Ea}{k}$), a ser determinado pelos dados.

O fator de aceleração pode ser descrito como mostra a equação 3.25.

$$AF = \left(\frac{U_A}{U_U}\right)^n e^{\left(\frac{B}{V_U} - \frac{B}{V_A}\right)} \quad 3.25$$

Onde:

- AF é o fator de aceleração do modelo;
- V_U é o nível de estressamento térmico na condição de uso;
- V_A é o nível de estressamento térmico na condição acelerada;
- U_U é o nível de estressamento não-térmico na condição de uso;
- U_A é o nível de estressamento não-térmico na condição acelerada.

O modelo de vida do estressamento, para uma PDF (função densidade de probabilidade) de Weibull, pode ser reformulada como mostra a equação 3.26, ou seja, a vida característica η original da distribuição de vida Weibull é substituída pelo modelo de estressamento T-NT, portanto a distribuição de vida não está mais somente em função do tempo, mas também por dois níveis de estímulos (estressamentos).

$$f(t, U, V) = \frac{\beta U^n e^{-\frac{B}{V}}}{c} \left(\frac{(t) \left(U^n e^{-\frac{B}{V}}\right)}{c}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{(t) \left(U^n e^{-\frac{B}{V}}\right)}{c}\right)^\beta} \quad 3.26$$

A partir da equação 3.26, todas as métricas da engenharia da confiabilidade podem ser obtidas, como a confiabilidade $R(t)$, a CDF (probabilidade acumulada de falha) $F(t)$, a taxa de falha $\lambda(t)$, o tempo médio até a falha $MTTF$, dentre outros.

Demais modelos de relação vida estresse

Os demais modelos que relacionam a vida com o estresse podem ser visualizados de forma resumida no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Outros modelos LSR utilizados em QALT

MODELOS	EQUAÇÃO	PARÂMETROS												
<p>Eyring (Temperatura ou Umidade)</p> <p>Estressamento único independente do tempo</p>	$L(V) = \frac{1}{V} e^{-\left(A - \frac{B}{V}\right)}$	<p>$L(V)$ = Medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função do nível de estressamento;</p> <p>V = Nível do estressamento em valores unitários e positivos;</p> <p>A = Constante de posição a ser determinado pelos dados de vida;</p> <p>B = Fator de estressamento a ser determinado pelos dados de vida.</p>												
<p>T-H (Temperatura - Umidade)</p> <p>Até dois estressamentos independentes do tempo</p>	$L(V, U) = A e^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}}$	<p>$L(V, U)$ = Medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função de dois níveis de estressamento;</p> <p>ϕ = Fator de estressamento pela temperatura a ser determinado pelos dados de vida;</p> <p>b = Fator de estressamento pela umidade (também conhecido como energia de ativação por umidade) a ser determinado pelos dados de vida;</p> <p>A = Constante de posição a ser determinado pelos dados de vida;</p> <p>V = Nível de estressamento pela temperatura em valores unitários e positivos;</p> <p>U = Nível de estressamento pela umidade em valores decimais ou percentuais;</p>												
<p>PPH (Riscos Proporcionais)</p> <p>Multiplos estressamentos independentes do tempo</p>	$\lambda(t, \underline{X}) = \lambda_0(t) \cdot g(\underline{X}, \underline{A})$ $\underline{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ $\underline{A} = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T$ $g(\underline{X}, \underline{A}) = e^{\underline{A}^T \underline{X}} = e^{\sum_{j=1}^m a_j x_j}$	<p>$\lambda(t, \underline{X})$ = Taxa de falha na duração t em função do vetor linha da covariável \underline{X};</p> <p>\underline{X} = Vetor linha com as covariáveis independentes da duração (tempo);</p> <p>\underline{A} = Vetor coluna com os parâmetros desconhecidos a ser determinado pelos dados de vida;</p> <p>$g(\underline{X}, \underline{A})$ = Função positiva, independente do tempo, que incorpora os efeitos das covariáveis (temperatura, umidade, pressão, tensão elétrica, corrente elétrica, etc.);</p> <p>$\lambda_0(t)$ = Taxa de falha dependente apenas do tempo. Ela pode ser adotada para distribuições não paramétricas ou assume a formulação da taxa de falha da distribuição de vida utilizada, Weibull, Exponencial e etc;</p> <p>m = Quantidade de estressamentos (independentes do tempo);</p>												
<p>GLL (Log Linear Generalizada)</p> <p>Multiplos estressamentos independentes ou dependentes do tempo</p>	$L(\underline{X}) = e^{\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_j}$ $\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ $\underline{X} = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$	<p>$L(\underline{X})$ = Medida de vida quantificável, como vida média, vida mediana ou vida característica em função das covariáveis;</p> <p>\underline{X} = Vetor linha com as covariáveis dependentes da duração (danos acumulados p/ GLL) e independentes da duração;</p> <p>α_0 e α_j = Parâmetros dos modelos e podem assumir os mesmos parâmetros das covariáveis relacionadas;</p> <table border="1" data-bbox="842 1697 1321 1904"> <thead> <tr> <th>TRANSFORMAÇÃO</th> <th>FORMA</th> <th>UTILIZAÇÃO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nenhuma</td> <td>$V = X$</td> <td>Modelo LSR exponencial, onde as variáveis discretas e valores igual a zero podem ser utilizadas</td> </tr> <tr> <td>Recíproca</td> <td>$V = 1/X$</td> <td>Modelo LSR exponencial</td> </tr> <tr> <td>Logarítmica</td> <td>$V = \ln(X)$</td> <td>Modelo LSR de potência</td> </tr> </tbody> </table>	TRANSFORMAÇÃO	FORMA	UTILIZAÇÃO	Nenhuma	$V = X$	Modelo LSR exponencial, onde as variáveis discretas e valores igual a zero podem ser utilizadas	Recíproca	$V = 1/X$	Modelo LSR exponencial	Logarítmica	$V = \ln(X)$	Modelo LSR de potência
TRANSFORMAÇÃO	FORMA	UTILIZAÇÃO												
Nenhuma	$V = X$	Modelo LSR exponencial, onde as variáveis discretas e valores igual a zero podem ser utilizadas												
Recíproca	$V = 1/X$	Modelo LSR exponencial												
Logarítmica	$V = \ln(X)$	Modelo LSR de potência												

Fonte: Autoria própria.

Em Pallerosi (2007), “a escolha do melhor modelo de estressamento depende principalmente das seguintes condições”:

- Experiência anterior;
- Normas técnicas, especificações de clientes (consumidores), ou contratos de fornecimento;
- Verificação dos principais meios de degradação (temperatura, vibração, etc.);
- Comparação com produtos similares.

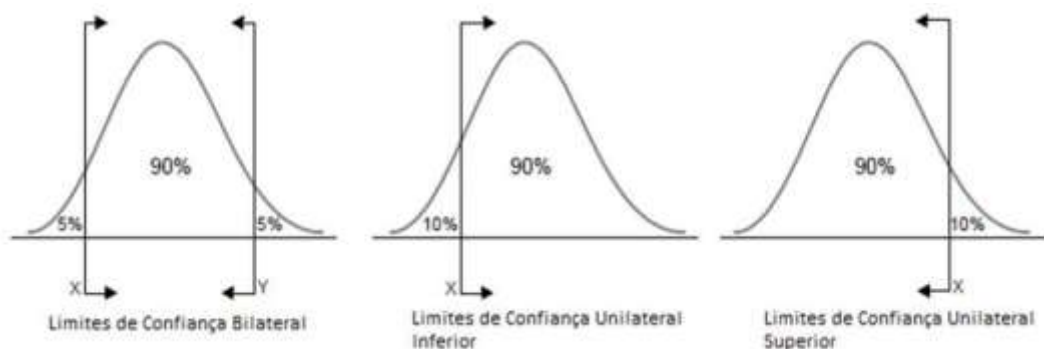
3.4 OUTROS CONCEITOS DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE

Demais outros conceitos estatísticos e de confiabilidade como, intervalos ou limites de confiança, estimadores, sistemas reparáveis e não-reparáveis, devem ser compreendidos para complementar a teoria.

3.4.1 Intervalos ou limites de confiança

O nível de confiança é a frequência com o qual o intervalo de tempo observado contém os parâmetros estatísticos das distribuições de vida, quando o experimento é repetido por várias vezes. Estes intervalos podem estar divididos em bilateral ou unilateral (Inferior ou superior) conforme mostra a Figura 3.15 abaixo:

Figura 3.15 – Limites de confiança



Fonte: Adaptado Reliasoft (2015).

No geral, a tarefa do engenheiro de confiabilidade é determinar a probabilidade de falha ou confiabilidade da população das unidades em questão. No entanto, nunca se saberá o valor exato de confiabilidade da população, a menos que seja possível obter e analisar os dados de falha para cada unidade da população. Como isso geralmente não é uma situação realista, a tarefa é estimar a confiabilidade com base em uma amostra (RELIASOFT, 2015).

Se realizarmos dez testes de confiabilidade diferentes para as unidades e analisarmos os resultados, obteremos parâmetros ligeiramente diferentes para a distribuição a cada vez e, portanto, resultados de confiabilidade levemente diferentes. No entanto, ao empregar limites de confiança, obtemos um intervalo dentro do qual esses valores de confiabilidade provavelmente ocorrem em uma determinada porcentagem do tempo. Isso nos ajuda a avaliar a utilidade dos dados e a precisão das estimativas resultantes. Além disso, é sempre útil lembrar que cada parâmetro é uma estimativa do parâmetro verdadeiro, um desconhecido para nós. Esse intervalo de valores plausíveis é chamado de intervalo de confiança (RELIASOFT, 2015).

O nível de confiança pode ser descrito como a proporção ou probabilidade de intervalos de confiança construídos em experimentos separados da mesma população e com o mesmo procedimento que contém os parâmetros das distribuições de vida.

3.4.2 Estimadores e ajuste de dados de vida

A NBR 50462 define valor estimado como sendo, “valor obtido a partir de uma amostra, com a finalidade de atribuir valores numéricos aos parâmetros de distribuição escolhida como modelo estatístico da respectiva população”.

A nota que menciona a definição de estimadores na norma NBR 50462, diz que “o resultado pode ser expresso por valor numérico simples, estimativa por pontos ou intervalo de confiança”.

Em Reliasoft Brasil (2008), para ajustar um modelo de distribuição de vida aos dados, é necessário conhecer os parâmetros do modelo escolhido e que a estimativa a ser realizada baseia-se na amostra dos dados coletados.

Os estimadores mais comuns utilizados em LDA e QALT são:

- Regressão linear em X ou Y (RRX, RRY), mínimos quadrados;

- Máxima verossimilhança (MLE), método não gráfico.

Em termos práticos devido a limitações de cada um dos métodos dos estimadores, Reliasoft Brasil (2008) descreve que para dados completos e pequenas amostras, o método da regressão linear ou mínimos quadrados (RRX, RRY) é o mais indicado, já para dados completos ou censurados, grandes amostras (>30), suspensões após todas as falhas e dados agrupados, o método da máxima verossimilhança (MLE) é o mais indicado para fazer a estimação dos parâmetros em LDA. A formulação básica da função de máxima verossimilhança MLE é dada conforme as equações 3.27 e 3.28.

$$L((x_1, v_1), (x_2, v_2), \dots, (x_N, v_N) | \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f(x_i, v_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad 3.27$$

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^N f(x_i, v_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad 3.28$$

Onde:

- $f(x, v; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ é a PDF de uma distribuição de vida associada a um estressamento;
- $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ são os parâmetros da distribuição de vida e do modelo de estressamento;
- $x(v)$ é uma variável contínua (tempo) em função do nível de estressamento v ;
- $(x_1, v_1), (x_2, v_2), \dots, (x_N, v_N)$ são N observações independentes de variáveis contínuas x com seus respectivos estressamentos v .

Em Fogliatto e Ribeiro (2009), a expressão nas equações 3.27 e 3.28 é função apenas do parâmetro desconhecido θ . O estimador de máxima verossimilhança de θ é, assim, o valor de θ que maximiza L , tal valor é obtido derivando a equação 3.27 ou 3.28 com relação a θ e igualando o resultado a zero, como demonstrado na equação 3.29.

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \ln L}{\partial \theta_i} = 0 \quad 3.29$$

Um dos melhores métodos para obter estimadores pontuais de parâmetros populacionais é o método da máxima verossimilhança. Como o nome sugere, um estimador de máxima verossimilhança será dado pelo valor do parâmetro que maximiza a função de verossimilhança (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Estimadores de máxima verossimilhança apresentam, em geral, propriedades assintóticas favoráveis. O estimador de máxima verossimilhança de qualquer parâmetro θ é não tendencioso para valores grandes de n e apresenta uma variância tão pequena quanto possível de ser obtida com qualquer outro estimador (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Reliasoft (2015) descreve que em QALT, o método de estimativa de parâmetros mais indicado é o MLE, pois a ideia por trás deste método é determinar os parâmetros que maximizam a probabilidade dos dados da amostragem, ou seja, ele é um estimador versátil e se aplica à maioria dos modelos e relações vida estresse LSR e a diferentes tipos de dados, além de quantificar a incerteza por meio dos limites de confiança.

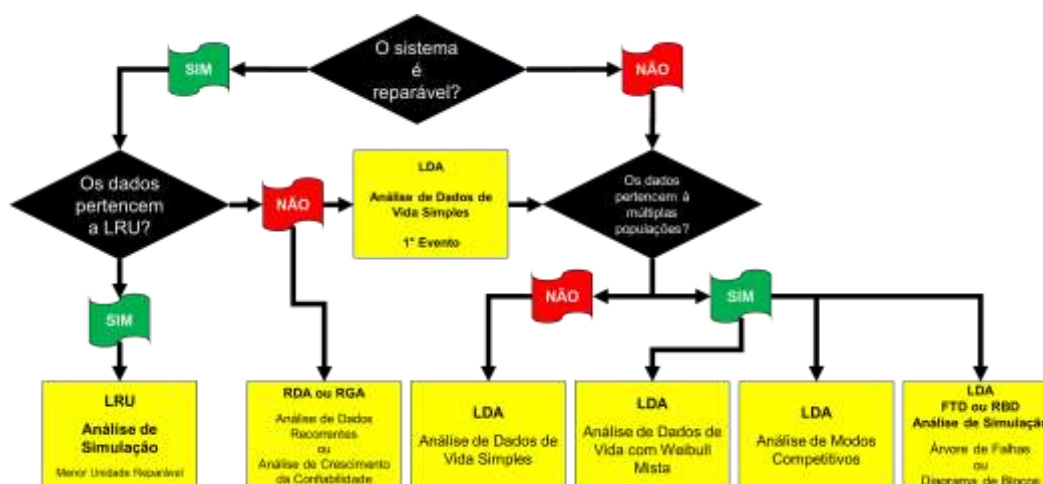
3.4.3 Confiabilidade de sistemas reparáveis e não-reparáveis

O que justifica um sistema ser reparável ou não-reparável é o custo envolvido na realização da tarefa de manutenção. Muitos destes sistemas possuem componentes internos considerados tecnicamente reparáveis, porém o custo para o reestabelecimento da função (para o qual foi projetado) por meio da atividade de reparo o torna economicamente inviável. As lâmpadas LED de refrigeradores podem ser consideradas tecnicamente reparáveis, pois possuem componentes eletrônicos passíveis de serem reparados com o intuito da lâmpada estabelecer sua função, porém sua manutenção é considerada economicamente inviável, assim sendo a lâmpada LED passa a ser definida como um sistema não-reparável e que, em sua aplicação, pertence a um sistema reparável, o refrigerador. Em outras palavras, se o refrigerador apresentar falhas no sistema de iluminação interna, significa que, do ponto de vista do sistema, que a lâmpada LED será substituída e que esta ação

representa o limite de reparo viável do sistema, em outras palavras a lâmpada LED é a menor unidade reparável do sistema LRU (*Lowest Repairable Unit*).

Lâmpada incandescente também é definida como um LRU do sistema (refrigerador), pelos mesmos motivos econômicos da lâmpada LED e também pelas características construtivas, o que torna a atividade de manutenção, reparo, neste caso tecnicamente inviável, uma lâmpada incandescente por si só é considerada não-reparável do ponto de vista técnico. O fluxograma demonstrado na Figura 3.16 permite decidir quais análises podem ser realizadas em sistemas reparáveis e não-reparáveis.

Figura 3.16 – Fluxograma para análises de sistemas reparáveis e não-reparáveis



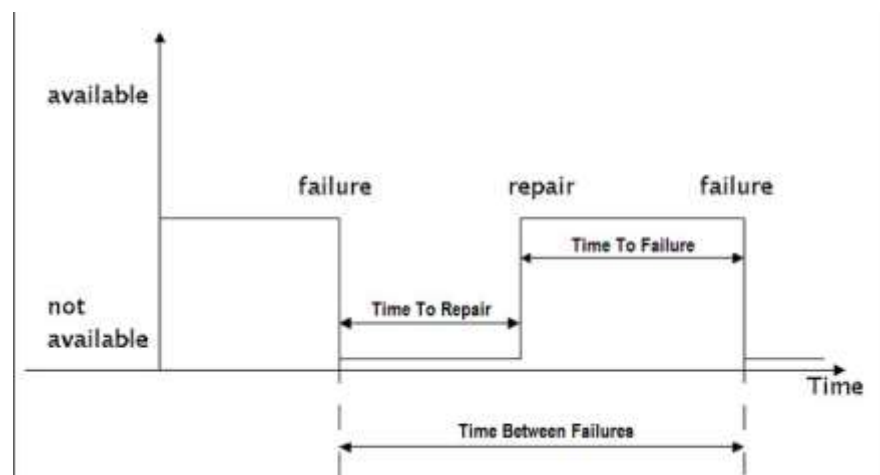
Fonte: Adaptado apostila de análise do custo do ciclo de vida, p. 108 – Mazzei (2015).

Para um item não-reparável, como uma lâmpada, um transistor, um motor de foguete ou uma espaçonave não tripulada, a confiabilidade é a probabilidade de sobrevivência sobre a vida esperada do item, ou por um período durante sua vida, quando apenas uma falha pode ocorrer. Durante a vida do item, a probabilidade instantânea da primeira e única falha é chamada de taxa de risco. Valores de vida, como a vida média ou tempo médio de falha (MTTF), ou a vida esperada pela qual uma certa porcentagem pode ter falhado (digamos 10%) (vida de percentil), são outras características de confiabilidade que podem ser usadas. Observe que os itens não-reparáveis podem ser peças individuais (lâmpadas, transistores, fixadores) ou sistemas compostos de muitas partes (espaçonaves, microprocessadores) (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 8).

A confiabilidade do sistema reparável também pode ser caracterizada pelo tempo médio entre falhas (MTBF), mas apenas sob a condição particular de uma taxa de falha constante. Muitas vezes, é assumido que as falhas ocorrem a uma taxa constante, caso em que a taxa de falha $\lambda = 1 / (\text{MTBF})$. No entanto, este é apenas um caso especial, valioso porque muitas vezes é verdade e porque é fácil de entender. Também estamos preocupados com a disponibilidade de itens reparáveis, já que o reparo leva tempo. A disponibilidade é afetada pela taxa de ocorrência de falhas (taxa de falhas) e pelo tempo de manutenção. A manutenção pode ser corretiva (isto é, reparada) ou preventiva (para reduzir a probabilidade de falha, por exemplo, lubrificação). Precisamos, portanto, entender a relação entre confiabilidade e manutenção e como a confiabilidade e a facilidade de manutenção podem afetar a disponibilidade. (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 8).

Por meio da Figura 3.17, é possível obter outras métricas utilizadas em análises de confiabilidade de sistemas.

Figura 3.17 – Tempos envolvidos em análise de confiabilidade de sistemas



Fonte: Magalhães (2018).

As métricas são:

- MTBF: Tempo médio entre falhas de um sistema reparável;
- MTTR: Tempo médio para reparo de um sistema reparável;
- MTBR: Tempo médio entre substituições (replacements), é geralmente usado para componentes ou subsistemas não reparáveis em um sistema reparável. Por exemplo, uma lâmpada em uma máquina é substituída após cada determinada hora de operação ou substituída em caso de

falha. A métrica do tempo médio entre substituições descreve o tempo médio entre duas substituições consecutivas sob essas condições;

- MTTF: Tempo médio até a falha de um sistema não-reparável. O termo MTTF é bastante confundido com o MTBF, é válido salientar que MTTF é apenas utilizado em sistemas não-reparáveis e o MTBF para sistemas reparáveis;
- MTBDE: Tempo médio entre eventos de *downing* (derrubadas), descreve o tempo esperado entre dois eventos consecutivos de *downing* para um sistema reparável;
- MTTFF: Tempo médio para a primeira falha de um sistema reparável.

Para o estudo de caso proposto neste trabalho, as métricas utilizadas são TTF (tempos até a falha) e MTTF, pois as lâmpadas incandescentes e LED são componentes não-reparáveis. Do ponto de vista do produto, o refrigerador é um sistema reparável tendo as lâmpadas como itens substitutivos.

3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 3

Os ensaios acelerados de vida (QALT) juntamente com as análises de dados de vida (LDA) somente podem ser compreendidos e realizados por meio do conhecimento dos conceitos de estatística aplicada e as relações de vida em função de um ou mais estressamentos. Dependendo da característica do item a ser testado ou conhecido seu mecanismo de falha, é possível definir a relação vida estresse (LSR) a ser utilizado nos ensaios. As lâmpadas incandescentes e LED possuem características construtivas distintas e conseqüentemente relações LSR distintas. O capítulo 4 descreve a construção da bancada de teste, o desenvolvimento de todas as análises e experimentos envolvidos na lâmpada incandescente e LED e os resultados de confiabilidade obtidos por meio dos conceitos compreendidos de LDA e QALT.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo descreve a construção da bancada de testes e o desenvolvimento das análises e experimentos envolvidos na determinação das métricas da confiabilidade das lâmpadas incandescentes e LED utilizadas em refrigeradores.

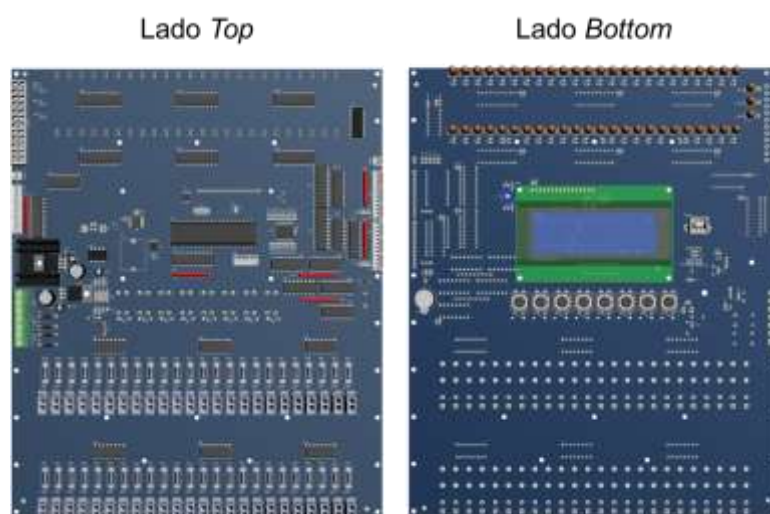
O trabalho é desenvolvido com base no entendimento das necessidades dos ensaios acelerados de vida para as lâmpadas incandescentes e LEDs, faz parte deste entendimento a especificação do projeto de uma bancada de teste para reproduzir as condições de funcionalidade, realizar medições das principais grandezas elétricas a serem estudadas e monitoradas e as medições dos tempos até a falha de cada uma das lâmpadas em teste. Para este trabalho entende-se como condições de funcionalidade, as operações do tipo contínuo e intermitente (*ON OFF*) e a corrente elétrica das lâmpadas como a grandeza elétrica a ser medida e monitorada. As normas para ensaios de qualificação de lâmpadas incandescentes e LED foram as principais referências para fazer o delineamento dos ensaios, tendo como base os conceitos dos modelos de relações vida estresse dos ensaios acelerados de vida QALT (*Quantitative Accelerated Life Test*) somados aos conhecimentos em análise de dados de vida LDA (*Life Data Analysis*), que permite obter as métricas da confiabilidade nas condições de uso, temperatura e tensão de uso. Todos os cálculos e resultados obtidos em análises QALT e LDA vieram por meio do uso de softwares estatísticos, como Minitab, ALTA e WEIBULL ++ da Reliasoft e Reliability Toolkit.

4.1 CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES

A bancada de teste foi construída para atender as principais necessidades dos ensaios acelerados de vida QALT. Ela está preparada para receber alimentações elétricas do tipo AC ou CC, por meio de uma fonte de tensão estabilizada ou um varivolt, e tem por objetivo transferir esta alimentação para os componentes em teste, afim de controlar e temporizar os estados de *ON* e *OFF* e monitorar as correntes elétricas de cada componente sob teste. O bastidor de teste da bancada é composto por uma placa eletrônica controladora baseada no

microcontrolador PIC com um sistema de medição de corrente elétrica baseado em resistores do tipo *shunt* ligado a um circuito de proteção de sobrecargas de corrente e de tensão, 48 LEDs sinalizadores de falhas respectivos a cada posto de teste, 3 LEDs de *status* da fonte CC interna e um display de 4 linhas e 20 colunas para programação e visualização do ensaio. Além da placa eletrônica controladora, o bastidor também é composto por uma fonte de alimentação CC, um contator para chaveamento das correntes dos componentes sob teste, uma chave liga e desliga, lâmpada de sinalização de energizado e um disjuntor. A bancada de teste está especificada para trabalhar com alimentações elétricas variáveis, onde tensão elétrica é permitido variação entre 1V e 350V e corrente elétrica é permitido variação entre 4mA a 200mA. O projeto em *SolidWorks* da placa controladora é mostrado na Figura 4.1.

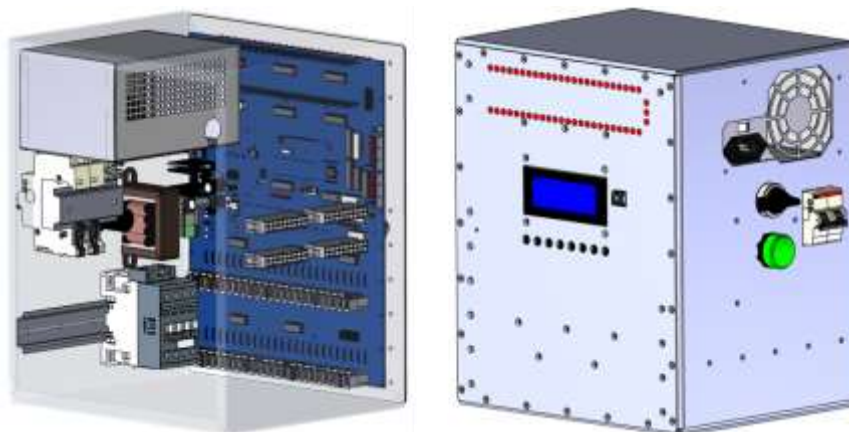
Figura 4.1 – Projeto *SolidWorks* da placa controladora



Fonte: Autoria própria.

O projeto em *SolidWorks* do bastidor de teste, com a placa controladora incorporada, é mostrado na Figura 4.2.

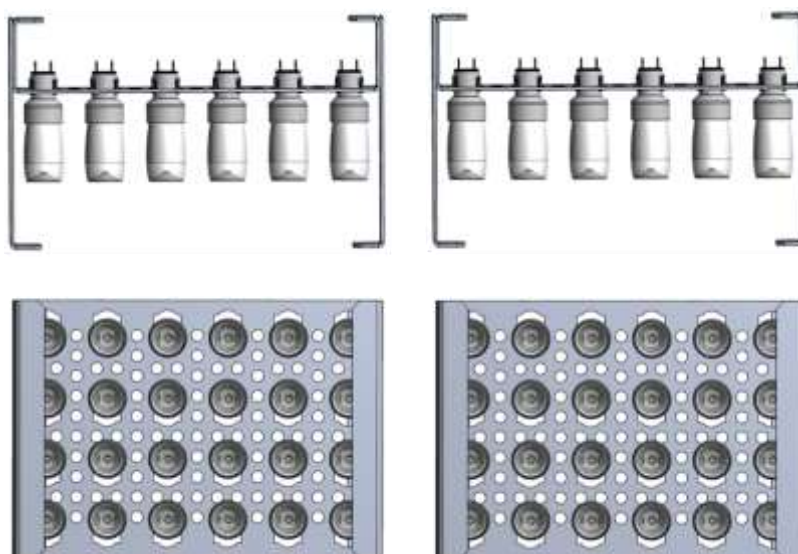
Figura 4.2 – Projeto *SolidWorks* do bastidor de teste



Fonte: Autoria própria.

Além do bastidor de teste, a bancada é formada também pelos berços de teste, pelo qual as lâmpadas incandescentes ou LEDs são acomodadas conforme a condição de uso no produto como mostra a Figura 4.3. Além dos ensaios em lâmpadas, a bancada de teste também está preparada para testar outros componentes elétricos, sendo necessário apenas a construção de novos berços de testes específicos para cada tipo de componente.

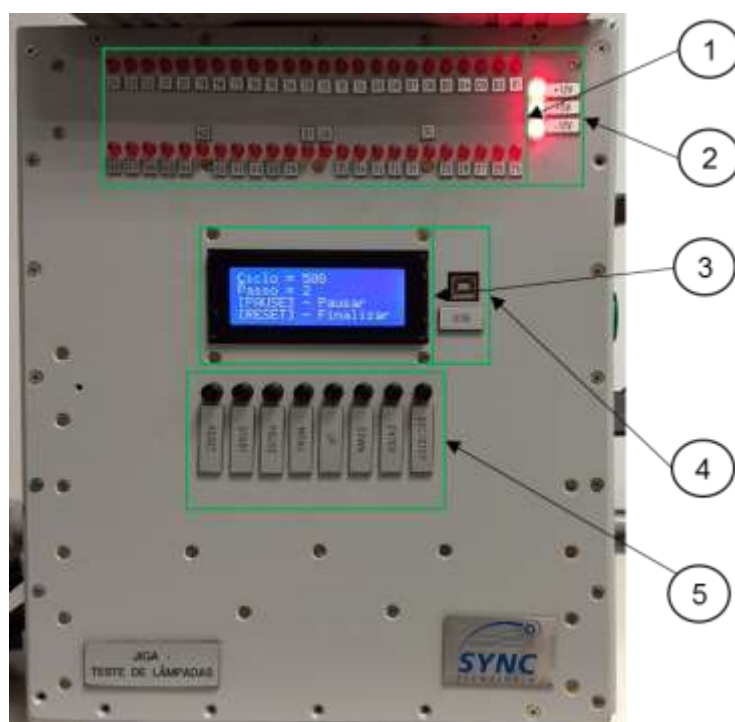
Figura 4.3 – Projeto *SolidWorks* dos berços de teste



Fonte: Autoria própria.

O painel frontal do bastidor de teste foi desenvolvido de forma intuitiva, afim de possibilitar o fácil entendimento das programações e as visualizações do *status* de cada componente sob teste, como mostra a Fotografia 4.1.

Fotografia 4.1 – Painel frontal do bastidor de teste



Fonte: Aatoria própria.

Onde:

- (1) LEDs sinalizadores de falhas, individual a cada componente sob teste. O LED aceso representa falha, LED apagado significa que não há falhas até o presente momento;
- (2) LEDs sinalizadores de *status* da fonte CC interna, LEDs acesos significam que a bancada de teste está disponível para uso;
- (3) *Display* para visualização geral da programação e monitoração do ensaio. O *display* permite a visualização dos tempos até a falha de cada componente em teste independentemente;

- (4) Saída USB de dados de tempos até a falha e medição de corrente. Utilizado em situações em que os dados precisam ser tratados e apresentados de forma gráfica numa tela;
- Teclado para programação do ensaio.

Com a bancada de testes, formada por berços de teste e bastidor de teste, torna-se possível o desenvolvimento dos ensaios acelerados de vida QALT.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO

Os ensaios foram realizados em conjunto com equipamentos de teste medição (fontes de alimentação e multímetro como medidor de temperatura) e câmara térmica e foram divididos em testes térmicos e não-térmicos.

Antes de iniciar o ensaio propriamente dito, foi necessário verificar a corrente elétrica referente a tensão de teste, este procedimento pode ser realizado junto a uma fonte de alimentação com medidor de corrente ou um amperímetro (multímetro com esta função) como mostra a Fotografia 4.2.

Fotografia 4.2 – Medição de corrente elétrica na tensão elétrica de teste



Fonte: Autoria própria.

A Fotografia 4.3 mostra o valor de corrente elétrica medido pela fonte de alimentação programado na bancada de teste, afim de possibilitar as análises de comparações e fazer os apontamentos das falhas encontradas durante o ensaio acelerado de vida, seja ela por divergência com a tolerância de corrente elétrica pré-definida pela bancada de teste, o que significa que há um indicativo de alteração de comportamento, ou por ausência da mesma que se caracteriza como um componente queimado.

Fotografia 4.3 – Programação da corrente elétrica na bancada de teste



Fonte: Autoria própria.

Para testes térmicos, onde a temperatura é a principal influência que se deseja avaliar, foi necessário a utilização de uma câmara térmica como mostra a Fotografia 4.4.

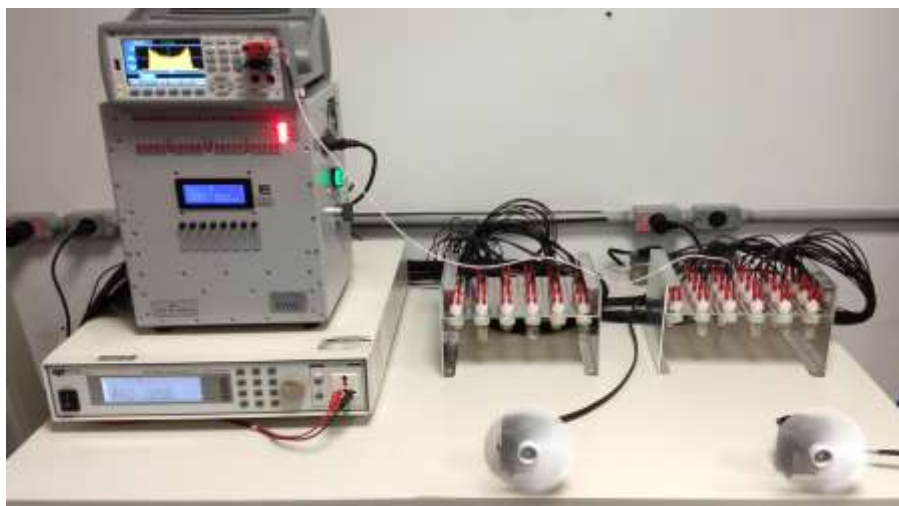
Fotografia 4.4 – Bancada de teste e fonte de alimentação AC (Teste térmico)



Fonte: Autoria própria.

Para testes não térmicos, onde a tensão elétrica é considerada a principal influência a ser estudada, foi necessário a utilização de uma fonte de alimentação AC estabilizada e variável como mostra a Fotografia 4.5.

Fotografia 4.5 – Bancada de teste, fonte de alimentação AC e multímetro como medidor de temperatura (Teste não-térmico)



Fonte: Autoria própria.

Em ambos os ensaios, térmicos e não-térmicos, referentes às lâmpadas incandescentes, a fonte de alimentação é utilizada para determinar as tensões de teste independentemente do modelo de relação vida estresse escolhido, T-NT (Temperatura - Não-Térmico) ou IPL (*Inverse Power Law*). Portanto, em ensaios onde a relação de estressamento segue o modelo T-NT foi necessário utilizar a fonte de alimentação AC em conjunto com a câmara térmica, pois o objetivo foi avaliar a interação da tensão elétrica com a temperatura ao mesmo tempo como mostra a Fotografia 4.4. No teste onde a relação de estressamento segue o modelo IPL não houve a necessidade de se utilizar a câmara térmica, mas sim a fonte de alimentação AC, dois ventiladores (um para cada berço de teste) e um multímetro com sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*) para medição de temperatura como mostra a Fotografia 4.5. O uso de ventiladores em testes não térmicos, foi para diminuir a influência do calor gerado entre as próprias lâmpadas utilizadas no ensaio no berço de teste, como recomenda a norma NBR 14671, “as lâmpadas não devem operar com temperaturas excessivas, nem deve haver aquecimento indevido de uma lâmpada por outras lâmpadas”, com a monitoração da temperatura feita pelo multímetro com esta função.

Devido a limitações técnicas e o tempo disponível, os ensaios acelerados de vida de lâmpadas LED não foram realizados, porém os dados de tempos até a falha de peças retornadas de campo foram disponibilizadas para as respectivas análises de confiabilidade.

4.3 ANÁLISES DE CONFIABILIDADE

Os ensaios acelerados de vida foram realizados nas lâmpadas incandescentes por desconhecimento de dados de campo, portanto com base no conhecimento adquirido das características da lâmpada incandescente por meio da norma NBR 14671, o principal modelo LSR escolhido foi o IPL. As lâmpadas incandescentes de refrigeradores são utilizadas em temperaturas próximas a 0°C (273,15 K), portanto o modelo T-NT também foi objeto de interesse neste estudo.

Os modos de falha encontrados em lâmpadas LED por meio das análises de causa raiz RCA (*Root Cause Analysis*) e os dados disponíveis de tempos até a falha TTF foram suficientes para fazer análise de dados de vida LDA.

Uma pesquisa divulgada por G1 Globo (2018) mostra que as portas dos refrigeradores são abertas em média 70 vezes ao dia, porém a pesquisa não divulgou o tempo médio de permanência de porta aberta, o que poderia facilitar os cálculos de projeção de vida real quando se realiza ensaios acelerados de vida com carregamentos QALT com aceleração da taxa de uso URA. Em lâmpadas incandescentes 127V e 220V, os ensaios QALT foram realizados em regime contínuo de funcionamento, o que significa que os dados de tempos até a falha (em horas) são excepcionalmente referentes ao tempo da lâmpada ligada, ou seja, o que significa portas do produto abertas. Em análises LDA das lâmpadas LED, os dados de tempos até a falha foram coletados conforme a condição de uso, regime de funcionamento intermitente.

4.3.1 Análise QALT em lâmpada incandescente 127V

A norma NBR 14671 é categórica em descrever que a vida da lâmpada depende da tensão elétrica de alimentação de uso, porém como a lâmpada incandescente opera em temperaturas mais baixas, devido a sua aplicação no uso em refrigeradores, a relação vida estresse de Arrhenius foi utilizada para formar a relação T-NT, ou seja dois estressamentos simultâneos aplicados. Os ensaios foram realizados nas tensões elétricas de 180V, 165V e 150V e nas temperaturas, -10°C (263,15 K), 15°C (273,15 K) e 25°C (298,15 K). Os ensaios foram combinados conforme mostrado no Quadro 4.1.

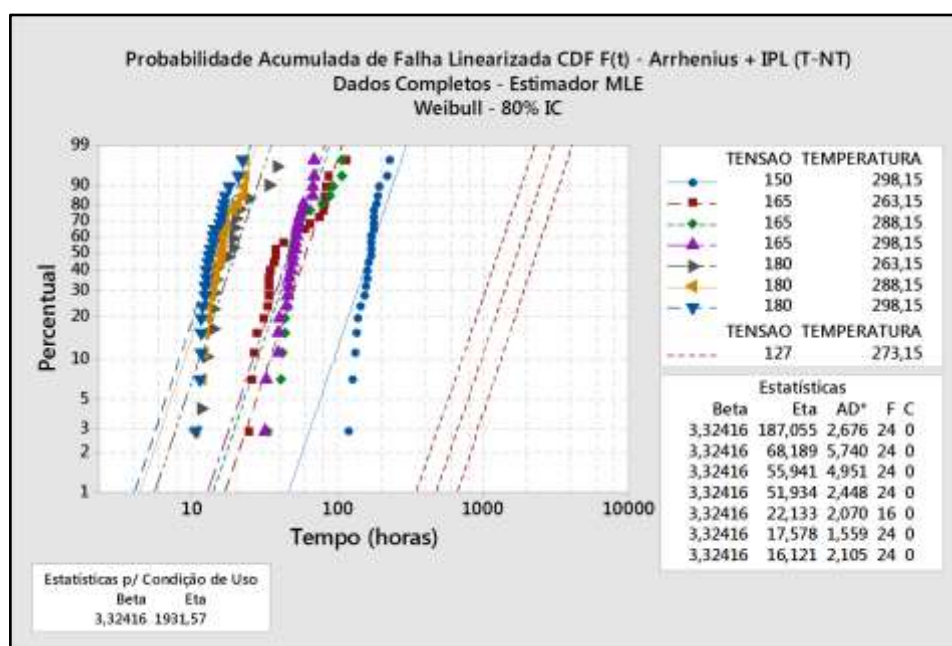
Quadro 4.1 – Combinação de ensaios T-NT lâmpada incandescente 127V

Tensão Elétrica (V)	Temperatura (K)	Modo
180	298,15	Contínuo
165	298,15	Contínuo
150	298,15	Contínuo
180	288,15	Contínuo
165	288,15	Contínuo
180	263,15	Contínuo
165	263,15	Contínuo

Fonte: Autoria própria.

Os dados coletados (tempos até a falha), Tabela A1 do Apêndice A, das lâmpadas incandescentes 127V submetidas em cada combinação de ensaio T-NT, foram inseridos no software de estatística Minitab e os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Análise QALT com modelo T-NT para lâmpada incandescente 127V



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.4 mostra as probabilidades acumuladas de falha CDF linearizadas de todas as sete combinações de ensaios realizados, por meio de uma distribuição de vida Weibull assumida com parâmetros de forma ou inclinação Beta constante e Eta diferentes para cada estressamento e para a condição de uso (127V e 273,15 K), estimados pelos dados de tempos até a falha em um intervalo de confiança de 80%. A Figura 4.5 apresenta os resultados das métricas da confiabilidade para a extrapolação realizada nas condições de uso e adversas obtidos por meio do software Minitab.

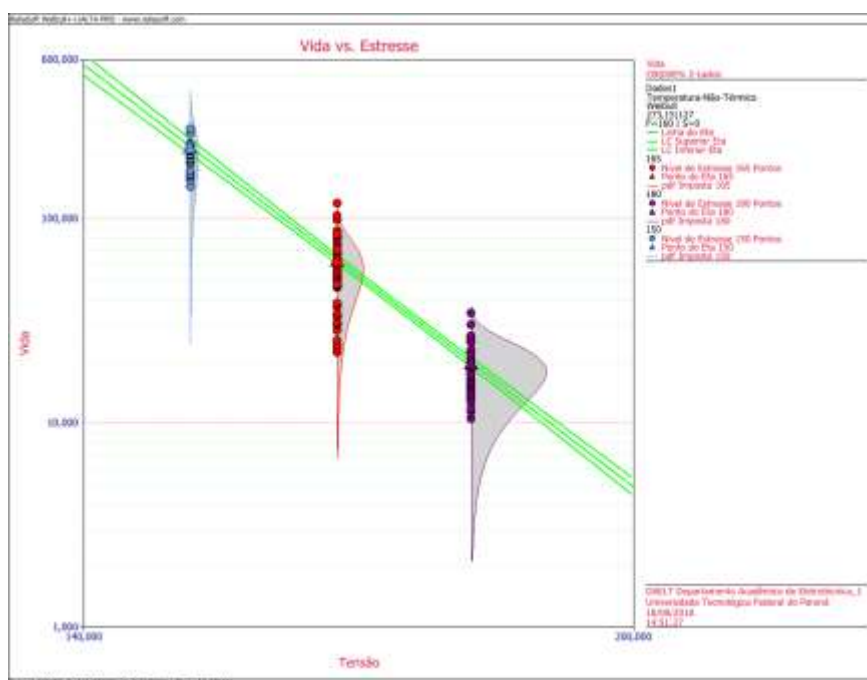
Figura 4.5 – Métricas da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V

Table of Percentiles (Life BX)						
Percent	TENSAO	TEMPERATURA	Percentile	Standard Error	80,0% Normal CI	
					Lower	Upper
10	127	298,15	890,964	128,726	740,368	1072,19
10	127	276,15	969,744	208,272	736,415	1277,00
10	127	273,15	981,532	237,290	720,030	1338,03
10	127	268,15	1001,80	290,753	690,628	1453,16
10	140	298,15	240,334	24,3761	211,040	273,694
10	140	276,15	269,732	40,9692	222,022	327,695
10	140	273,15	274,208	46,6574	220,484	341,022
10	140	268,15	281,947	57,2336	217,364	365,720
50	127	298,15	1570,30	216,935	1315,50	1874,44
50	127	276,15	1709,14	355,254	1309,46	2230,82
50	127	273,15	1729,92	407,034	1279,59	2336,74
50	127	268,15	1765,63	502,128	1226,36	2542,05
50	140	298,15	423,581	39,0593	376,369	476,715
50	140	276,15	475,395	67,9033	395,874	570,890
50	140	273,15	483,283	78,1635	392,812	594,591
50	140	268,15	496,924	97,1218	386,821	638,365
90	127	298,15	2253,36	310,748	1888,33	2688,96
90	127	276,15	2452,60	505,106	1883,66	3193,39
90	127	273,15	2482,42	579,362	1840,68	3347,89
90	127	268,15	2533,67	715,781	1764,06	3639,03
90	140	298,15	607,834	55,8373	540,327	683,775
90	140	276,15	682,187	95,9300	569,689	816,901
90	140	273,15	693,507	110,636	565,276	850,826
90	140	268,15	713,080	137,821	556,631	913,503

Table of Survival Probabilities (Reliability)					
Time	TENSAO	TEMPERATURA	Probability	80,0% Normal CI	
				Lower	Upper
272	127	298,15	0,997961	0,995674	0,999040
272	127	276,15	0,998461	0,995632	0,999459
272	127	273,15	0,998522	0,995334	0,999532
272	127	268,15	0,998619	0,994707	0,999640
272	140	298,15	0,853006	0,785068	0,900813
272	140	276,15	0,897328	0,813223	0,944816
272	140	273,15	0,902518	0,809054	0,951564
272	140	268,15	0,910736	0,800416	0,961490
750	127	298,15	0,942298	0,894471	0,968822
750	127	276,15	0,956145	0,892095	0,982541
750	127	273,15	0,957835	0,884282	0,985022
750	127	268,15	0,960549	0,868361	0,988588
750	140	298,15	0,009749	0,001005	0,044775
750	140	276,15	0,042629	0,003210	0,176586
750	140	273,15	0,050426	0,002765	0,219840
750	140	268,15	0,065660	0,002028	0,302384
8760	127	298,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	127	276,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	127	273,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	127	268,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	140	298,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	140	276,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	140	273,15	0,000000	0,000000	0,000000
8760	140	268,15	0,000000	0,000000	0,000000

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.7 – Tensão versus horas de vida

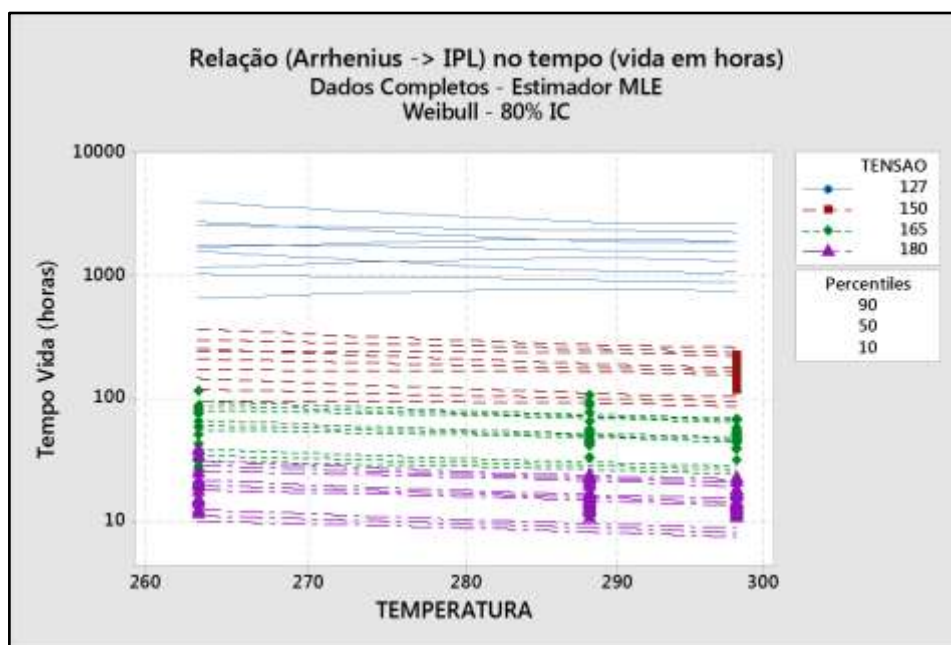


Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 4.7 que a vida da lâmpada incandescente é significativamente influenciada pela tensão elétrica. A inclinação da curva é acentuadamente decrescente e os formatos das PDFs tendem a ficarem maiores à medida que o estressamento aumenta, o que significa que há uma influência significativa da tensão sobre a vida da lâmpada incandescente.

A interação da relação Arrhenius com IPL e IPL com Arrhenius também foram realizadas para cada estressamento e também para a condição de uso (127V e 273,15 K) com a demonstração das variações das vidas B10, B50 e B90 respectivamente, como mostram as Figuras 4.8 e 4.9. Em Minitab (2018) “uma interação ocorre quando o tempo de falha de uma unidade em um nível da variável de aceleração depende do nível da segunda variável”.

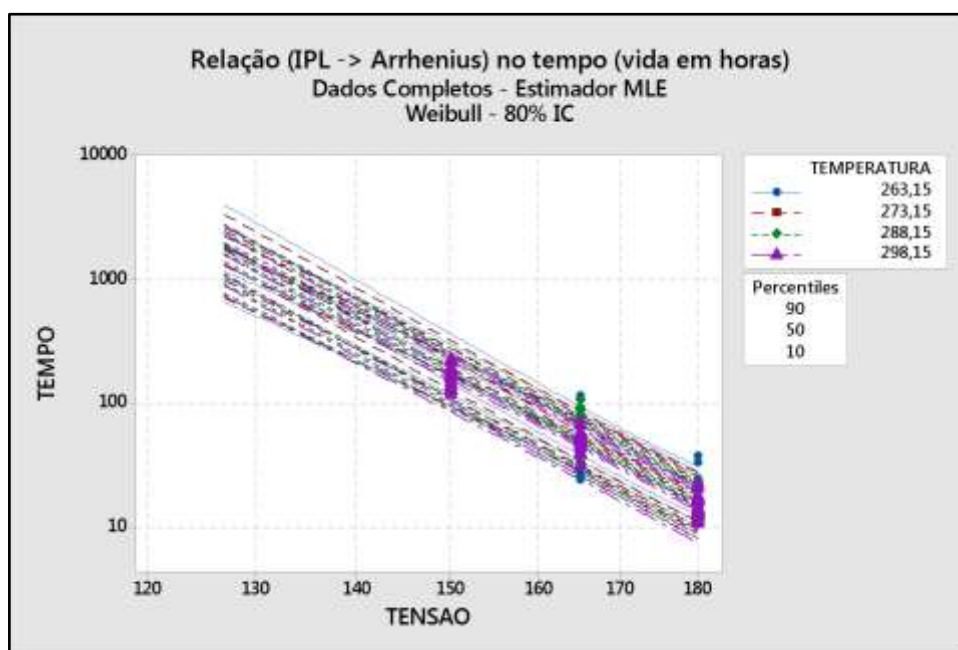
Figura 4.8 – Interação do estressamento Arrhenius com IPL



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.8 as inclinações das curvas das vidas B10, B50 e B90 decrescem suavemente, com diminuições dos intervalos entre as vidas Bx, para cada nível de tensão em relação ao aumento da temperatura. As curvas das vidas B50 de todos os níveis de tensão de teste têm um suave crescimento na inclinação em relação ao aumento da temperatura, quando comparados com as vidas B10 e B90, em relação ao aumento da temperatura. Nas condições de teste observa-se que não há interações entre os intervalos das respectivas vidas B10, B50 e B90 nas temperaturas mais baixas até as mais altas e com intervalos de vida significativamente maiores nas temperaturas mais baixas e menores nas temperaturas mais altas, o que resulta, na condição de uso 127V, em uma curva com intervalos de vida Bx maiores comparados aos dos demais níveis de tensão utilizados nos ensaios, e com interações entre vidas B10, B50 e B90, porém estável com relação ao aumento da temperatura, ou seja, não é possível afirmar se há uma inclinação crescente ou decrescente. As variações da tensão foram suficientes para influenciar nas temperaturas de teste, o que indica baixa influência da temperatura na vida da lâmpada incandescente.

Figura 4.9 – Interação do estressamento IPL com Arrhenius

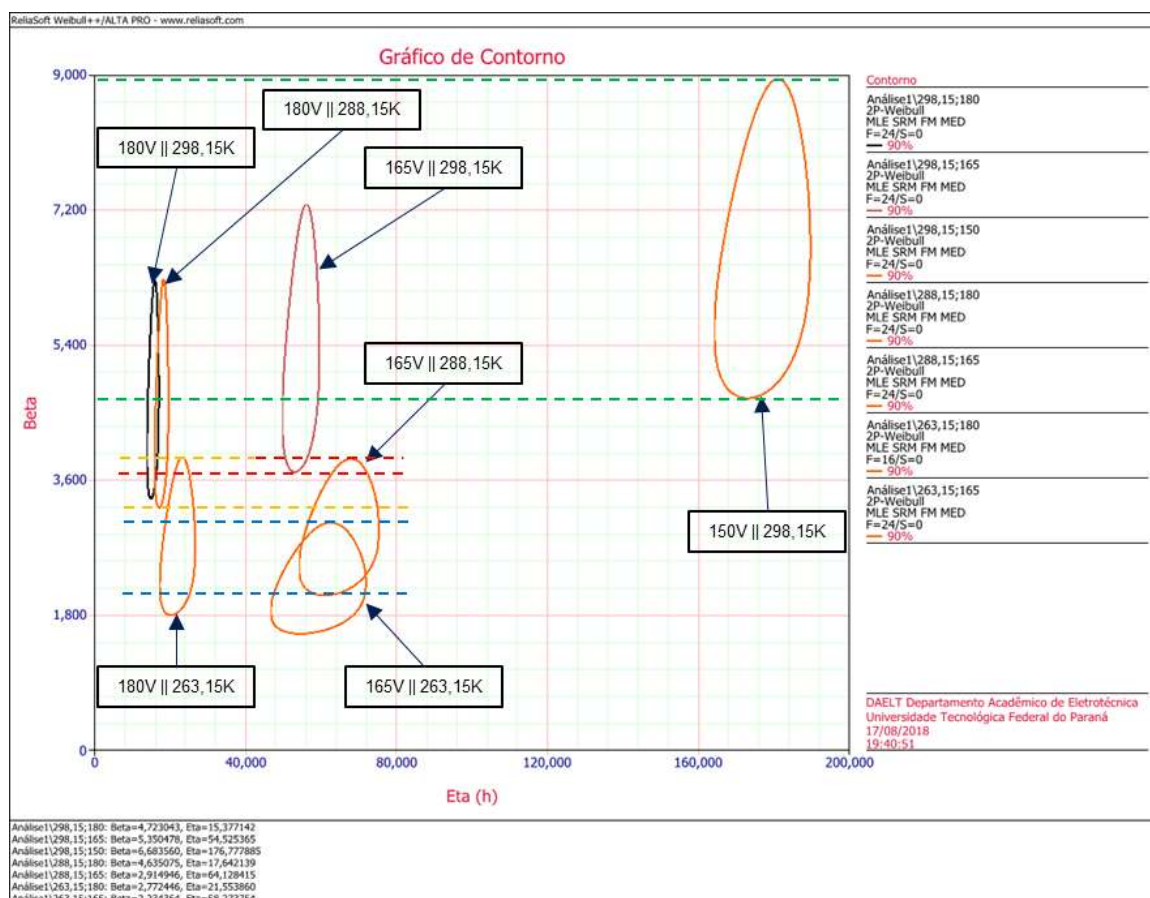


Fonte: Autoria própria.

Quando há interações entre estressamentos, também é possível afirmar que a vida é significativamente influenciada pela tensão. Na Figura 4.9 a situação é bem diferente, as inclinações das curvas das vidas decrescem significativamente, com diminuições dos intervalos entre as vidas Bx de forma suave, para cada nível de temperatura em relação ao aumento da tensão. Não é possível observar variações na inclinação das curvas entre as vidas para cada nível de temperatura. Na condição de teste observa-se que há intersecções entre os intervalos das respectivas vidas B10, B50 e B90 nas tensões mais baixas até as mais altas e com intervalos de vida suavemente maiores nas tensões mais baixas e menores nas tensões mais altas, o que resulta, na condição de uso 273,15 K, em uma curva com intervalos de vida pouco alterado quando comparados aos dos demais níveis de temperatura utilizados nos ensaios, com intersecções entre vidas B10, B50 e B90, porém acentuadamente decrescente em relação ao aumento da tensão, portanto é possível afirmar que as variações da temperatura não foram suficientes para influenciar nas tensões de teste, o que indica uma significativa influência da tensão na vida da lâmpada incandescente.

Para verificar a qualidade do ensaio acelerado de vida, ou seja, se os níveis de estressamento modificaram ou não as características de vida das lâmpadas incandescentes (Beta e Eta), foi utilizado o gráfico de contorno como mostrado na Figura 4.10 por meio do uso do software WEIBULL++ da Reliasoft.

Figura 4.10 – Gráfico de contorno do ensaio T-NT (Arrhenius – IPL)



Fonte: Autoria própria.

O gráfico de contorno da Figura 4.10 fornece um cenário de análise individual para cada estressamento e as interações que existem entre eles, é possível observar três grupos de combinações de ensaios “coordenados” pela tensão de alimentação. O primeiro grupo a esquerda do gráfico, formado pelos estressamentos “180V||298,15K”; “180V||288,15K” e “180V||263,15K”, com tensão constante em 180V e temperatura variável, é possível observar que as temperaturas não alteram as características do comportamento das falhas (Beta) e as vidas características (Eta) não são significativamente alteradas. O segundo grupo ao meio

do gráfico, formado pelos estressamentos “165V||298,15K”; “165V||288,15K” e “165V||263,15K”, com tensão constante em 165V e temperatura variável, é possível observar que as temperaturas 298,15K e 288,15K ainda possuem relações, sendo que o comportamento da falha (Beta) tende a ter menos significância e as vidas características (Eta) também não são significativamente alteradas, porém o estressamento “165V||263,15K dá sinais de que em temperaturas mais baixas com tensões mais baixas, quando comparadas ao primeiro grupo de combinação de ensaios, os comportamentos das falhas (Beta) podem sofrer alterações, porém sem alterar significativamente a vida característica (Eta). O terceiro grupo, formado por um único estressamento em “150V||298,15K” com tensão mais próxima da condição de uso apresenta um contorno mais amplo que os demais estressamentos de tensão na mesma temperatura 298,15K, quando comparado com os dois grupos de ensaios, ou seja, pode assumir valores de Betas bem altos, o que significa que a lâmpada incandescente pode falhar com um desgaste bastante acentuado com alterações de menor intensidade de Eta, caso a lógica e a tendência observada entre os grupos de ensaios localizados a esquerda e ao meio do gráfico permaneçam, as temperaturas mais baixas e a tensão de uso 127V será possível observar que os comportamentos das falhas poderão sofrer alterações no âmbito do desgaste e com um ganho na vida vida característica Eta no uso em temperaturas mais baixas como na condição de uso em 273,15K.

Os mesmos dados utilizados na relação T-NT na temperatura de 298,15K, foram utilizados para a análise QALT com a relação IPL, onde foi considerado apenas as variações de tensão, 180V, 165V e 150V, como mostra a combinação dos ensaios no Quadro 4.2.

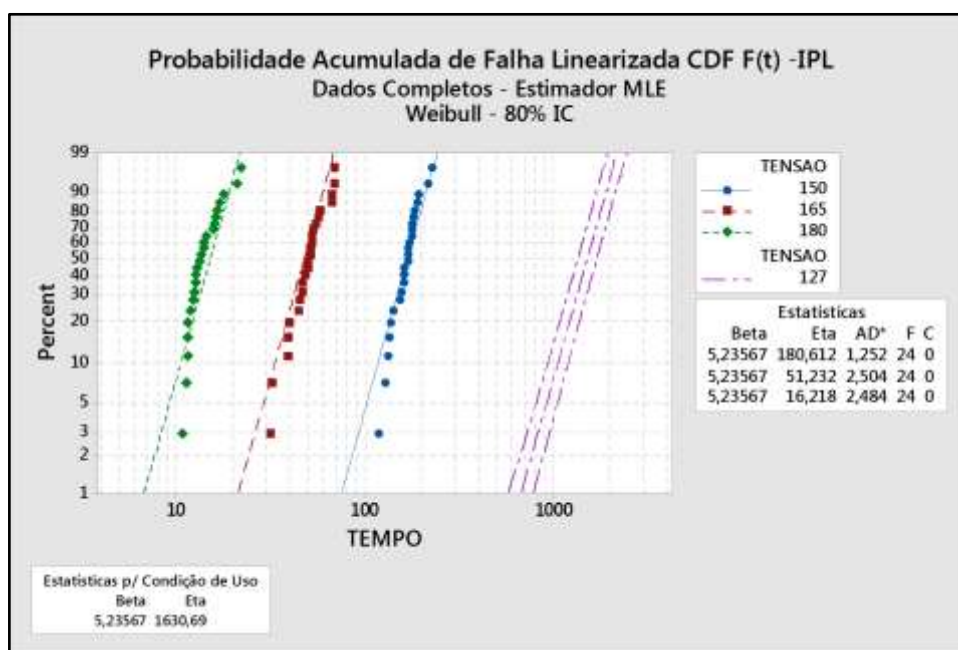
Quadro 4.2 – Combinação de ensaios IPL lâmpada incandescente 127V

Tensão Elétrica (V)	Temperatura (K)	Modo
180	298,15	Contínuo
165	298,15	Contínuo
150	298,15	Contínuo

Fonte: Autoria própria.

Os dados coletados (tempos até a falha), Tabela A2 do Apêndice A, das lâmpadas incandescentes 127V submetidas em cada combinação de ensaio IPL, foram inseridos no software de estatística Minitab e os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Análise QALT com modelo IPL para lâmpada incandescente 127V



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.11 mostra as probabilidades acumuladas de falha CDF linearizadas de todas as três combinações de ensaios realizados, por meio de uma distribuição de vida Weibull assumida com parâmetros de forma ou inclinação Beta constante e Eta diferentes para cada estresseamento e para a condição de uso (127V), estimados pelos dados de tempos até a falha em um intervalo de confiança de 80%. A Figura 4.12 apresenta os resultados das métricas da confiabilidade para a extrapolação realizada nas condições de uso e adversas obtidos por meio do software Minitab.

Figura 4.12 – Métricas da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V

Table of Percentiles (Life Bx)					
Percent	TENSAO	Percentile	Standard Error	80,0% Normal CI	
				Lower	Upper
10	103	16914,5	2733,20	13750,7	20806,3
10	127	1060,97	103,083	936,761	1201,66
10	140	292,541	20,8234	267,036	320,483
50	103	24239,5	3842,94	19782,7	29700,5
50	127	1520,44	136,631	1355,05	1706,02
50	140	419,229	24,8775	388,530	452,355
90	103	30486,6	4870,51	24842,3	37413,3
90	127	1912,29	173,330	1702,57	2147,83
90	140	527,273	31,4000	488,530	569,090

Table of Survival Probabilities (Reliability)				
Time	TENSAO	Probability	80,0% Normal CI	
			Lower	Upper
272	103	1,00000	1,00000	1,00000
272	127	0,99992	0,99972	0,99997
272	140	0,93056	0,88782	0,95740
750	103	1,00000	1,00000	1,00000
750	127	0,98301	0,96427	0,99196
750	140	0,00000	0,00000	0,00012
8760	103	0,99664	0,98871	0,99901
8760	127	0,00000	0,00000	0,00000
8760	140	0,00000	0,00000	0,00000

Fonte: Autoria própria.

As demais métricas da confiabilidade para os ensaios T-NT e IPL das lâmpadas incandescentes 127V operando em modo contínuo de funcionamento, foram calculadas por meio do software Reliability Toolkit e equação 3.5 como mostra o Quadro 4.3.

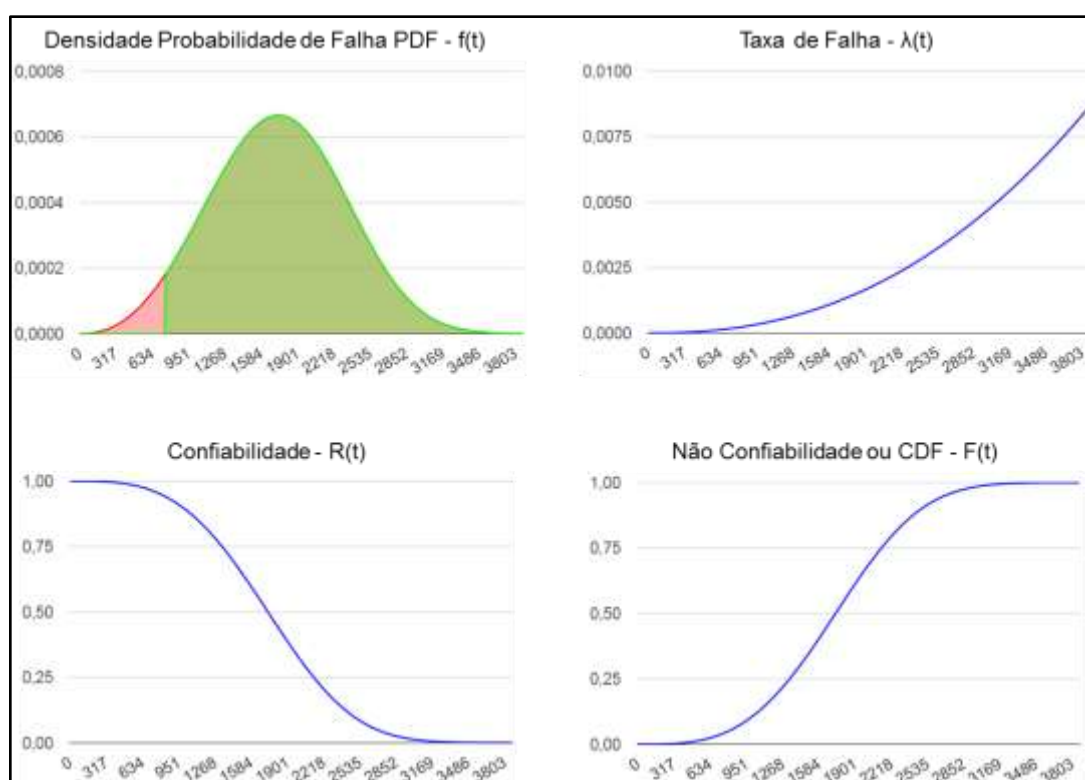
Quadro 4.3 – Métricas complementares da confiabilidade dos ensaios T-NT e IPL para lâmpadas 127V

Métricas	Resultado Ensaio T-NT	Resultado Ensaio IPL	Diferença Ensaio (T-NT) - (IPL)	Unidade ou Percentual	Meio de Cálculo
MTTF	1734	1502	232	horas	Reliability Toolkit
β	3,324	5,236	-1,912	-	Minitab
η	1932	1631	301	horas	Minitab
Vida B10	982	1061	-79	horas	Minitab
Vida B50	1730	1520	209	horas	Minitab
Vida B90	2483	1912	571	horas	Minitab
R(750 horas)	95,784	98,301	-3	%	Minitab
R(8760 horas)	0	0	0	%	Minitab
λ (750 horas)	0,0001908	0,0001196	0,0000711	falhas/hora	Calculado equação 3.5

Fonte: Autoria própria.

Os gráficos de confiabilidade extrapolados para a condição de uso obtidos por meio do software Reliability Toolkit referentes ao ensaio T-NT, podem ser visualizados na Figura 4.13.

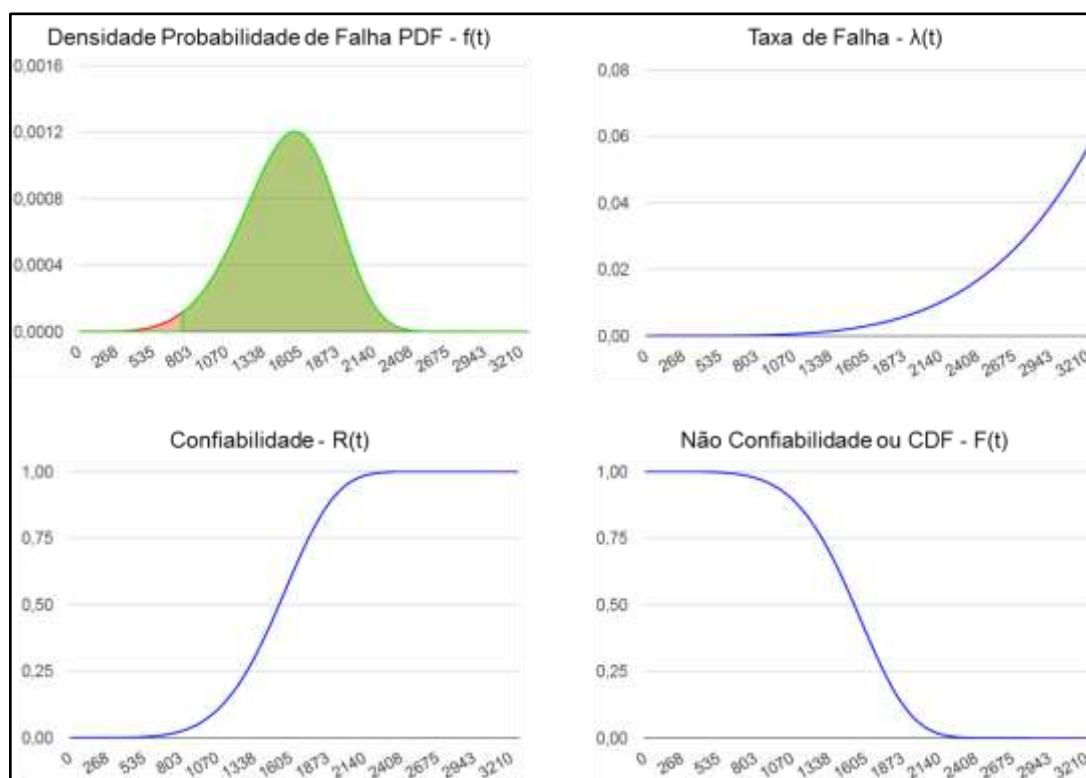
Figura 4.13 – Gráficos da confiabilidade modelo T-NT lâmpadas incandescentes 127V



Fonte: Autoria própria.

Os gráficos de confiabilidade extrapolados para a condição de uso obtidos por meio do software Reliability Toolkit referentes ao ensaio IPL, podem ser visualizados na Figura 4.14.

Figura 4.14 – Gráficos da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 127V



Fonte: Autoria própria.

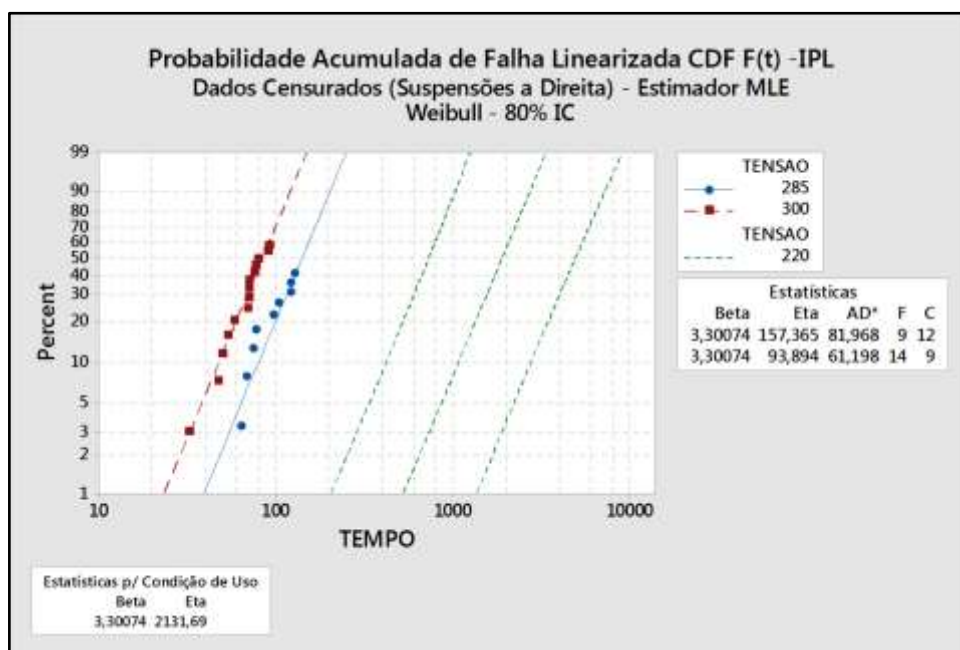
Além das métricas obtidas, o Quadro 4.3 nos mostra que os ensaios T-NT, que carrega os efeitos das variações das temperaturas, apresenta resultados pouco significativos de confiabilidade no final da vida declarada (750 horas), 3% a menos, quando comparados somente com as métricas dos ensaios IPL realizados na temperatura 298,15K. As variações de ganhos de tempo de vida, devido o carregamento das diferentes temperaturas dos ensaios T-NT, referente as métricas MTTF, Eta (η) e vida B90, só começam a ter efeitos após o dobro da vida declarada de 750 horas, a partir de 1500 horas (equivalente ao MTTF do ensaio IPL). As Figuras 4.13 e 4.14 mostram as tendências das respectivas curvas da função densidade probabilidade de falha, taxa de falha, confiabilidade e da função

probabilidade acumulada de falha (Não confiabilidade) dos ensaios T-NT e IPL respectivamente.

4.3.2 Análise QALT em lâmpada incandescente 220V

Por apresentar características equivalentes de uma lâmpada incandescente 127V, somente a relação vida estresse IPL foi utilizado no ensaio acelerado de vida para as lâmpadas 220V. Os ensaios foram realizados nas tensões elétricas de 300V e 285V em temperatura ambiente 25°C (298,15 K). Os dados coletados (tempos até a falha), Tabela A3 do Apêndice A, das lâmpadas incandescentes 220V submetidas em cada combinação de ensaio IPL, foram inseridos no software de estatística Minitab e os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Análise QALT com modelo IPL para lâmpada incandescente 220V



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.15 mostra as probabilidades acumuladas de falha CDF linearizadas das duas combinações de ensaios realizados, por meio de uma distribuição de vida Weibull assumida com parâmetros de forma ou inclinação Beta constante e Eta diferentes para cada estresse e para a condição de uso

(220V), estimados pelos dados de tempos até a falha em um intervalo de confiança de 80%. A Figura 4.16 apresenta os resultados das métricas da confiabilidade para a extrapolação realizada nas condições de uso e adversas obtidos por meio do software Minitab.

Figura 4.16 – Métricas da confiabilidade dos ensaios IPL para lâmpadas 220V

Table of Percentiles (Life Bx)					
Percent	TENSAO	Percentile	Standard Error	80,0% Normal CI	
				Lower	Upper
10	198	3113,86	3120,98	861,897	11249,7
10	220	1078,03	792,486	420,229	2765,54
10	242	412,962	204,783	218,732	779,664
50	198	5510,20	5595,54	1499,60	20246,9
50	220	1907,66	1423,91	732,936	4965,19
50	242	730,765	368,070	383,218	1393,51
90	198	7927,36	8163,30	2118,33	29666,4
90	220	2744,50	2090,19	1034,14	7283,56
90	242	1051,33	547,165	539,600	2048,36

Table of Survival Probabilities (Reliability)				
Time	TENSAO	Probability	80,0% Normal CI	
			Lower	Upper
272	198	0,999966	0,996829	1,00000
272	220	0,998882	0,971091	0,99996
272	242	0,973796	0,798638	0,99687
1000	198	0,997523	0,836767	0,99997
1000	220	0,921071	0,158777	0,99633
1000	242	0,142003	0,000000	0,80369
8760	198	0,040691	0,000000	0,96053
8760	220	0,000000	0,000000	0,05201
8760	242	0,000000	0,000000	0,00000

Fonte: Autoria própria.

As demais métricas da confiabilidade, para os ensaios IPL das lâmpadas incandescentes 220V operando em modo contínuo de funcionamento, foram calculadas por meio do software Reliability Toolkit e equação 3.5 como mostra o Quadro 4.4.

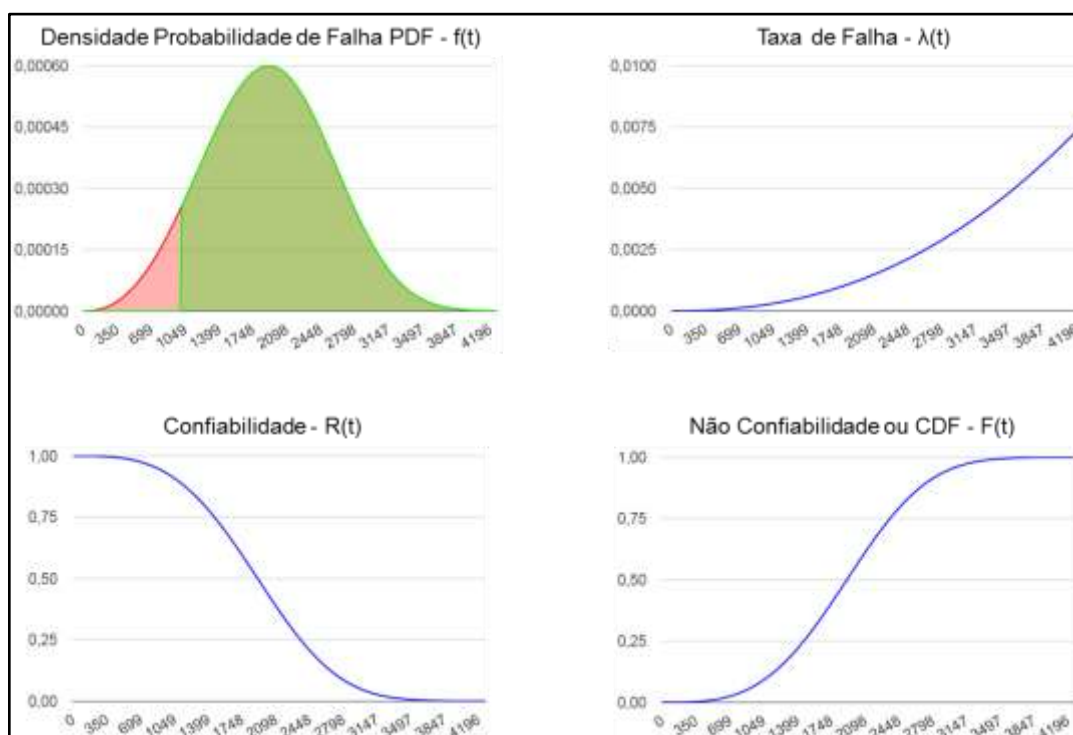
Quadro 4.4 – Métricas complementares da confiabilidade dos ensaios IPL para lâmpadas 220V

Métricas	Resultado Ensaio IPL	Unidade ou Percentual	Meio de Cálculo
MTTF	1913	horas	Reliability Toolkit
β	3,301	-	Minitab
η	2132	horas	Minitab
Vida B10	1078	horas	Minitab
Vida B50	1908	horas	Minitab
Vida B90	2745	horas	Minitab
R(1000 horas)	92,107	%	Minitab
R(8760 horas)	0	%	Minitab
λ (1000 horas)	0,0002714	falhas/hora	Calculado equação 3.5

Fonte: Autoria própria.

Os gráficos de confiabilidade extrapolados para a condição de uso obtidos por meio do software Reliability Toolkit podem ser visualizados na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Gráficos da confiabilidade modelo IPL lâmpadas incandescentes 220V



Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.17 mostra as tendências das respectivas curvas da função densidade probabilidade de falha, taxa de falha, confiabilidade e da função probabilidade acumulada de falha (Não confiabilidade) dos ensaios IPL.

Para transferir os tempos obtidos nos ensaios de funcionamento contínuo para a condição de uso, ou seja, regime de funcionamento intermitente, onde a lâmpada somente acende quando solicitadas por meio de aberturas de portas produto, é necessário somar todos os tempos de permanência de portas abertas ocorridas durante o dia e dividir pela quantidade de aberturas realizadas ao dia, ou seja, é necessário conhecer o tempo médio de permanência de portas abertas ao dia para fazer as projeções dos tempos obtidos por meio das métricas da confiabilidade em horas, dias, meses ou anos de vida da lâmpada em uso no produto.

4.3.3 Análise LDA em lâmpada LED bivolt

Foi identificado um volume significativo de trocas de lâmpadas LED de um único fabricante referente a dois modelos de refrigeradores que apresentam as condições de uso semelhantes, operam nas mesmas tensões de alimentação em 127V ou 220V e apresentam temperaturas de trabalho variáveis no compartimento refrigerador e no compartimento freezer semelhantes, onde pelo qual as lâmpadas LEDs estão expostas em seus ambientes de uso. Os dados de tempos até a falha das lâmpadas foram coletados para os dois refrigeradores, porém antes foi necessário realizar análises de causa raiz RCA para compreender se os efeitos de falhas encontrados estão compatíveis com os mecanismos de falhas existentes, ou seja, devido a quantidade da amostragem retornadas de campo ser consideravelmente alta, foi necessário compreender o mecanismo de falha de algumas amostras para tornar válido os efeitos encontrados nas demais e a partir de então, por questões práticas, considerar os dados coletados de tempos até a falha somente pelo conhecimento dos efeitos encontrados e não mais sobre uma análise RCA realizada em 100% das amostras recebidas.

A lâmpada LED é constituída por diversos componentes eletrônicos, como capacitores, resistores, transformadores, diodos e circuitos integrados que fazem parte do circuito eletrônico (*driver*) e os próprios LEDs interligados eletricamente em

uma associação série em um módulo com dissipação térmica como mostrado na Fotografia 2.2. A análise dos mecanismos de falha iniciou por meio de realização de testes funcionais e seguiu uma sequência de verificações em temperatura ambiente e em temperaturas mais baixas, constatou-se que as lâmpadas acendiam quando ligadas em temperatura ambiente, porém quando expostas às condições variadas de temperaturas mais baixas, aproximadamente abaixo de 0°C, apagavam repentinamente, o que levou a concluir que a temperatura mais baixa era o catalizador principal do mecanismo de falha e, portanto, foi necessário fazer uma análise mais profunda. A análise RCA seguiu como mostrado na Fotografia 4.6.

Fotografia 4.6 – Evolução da análise de causa raiz RCA



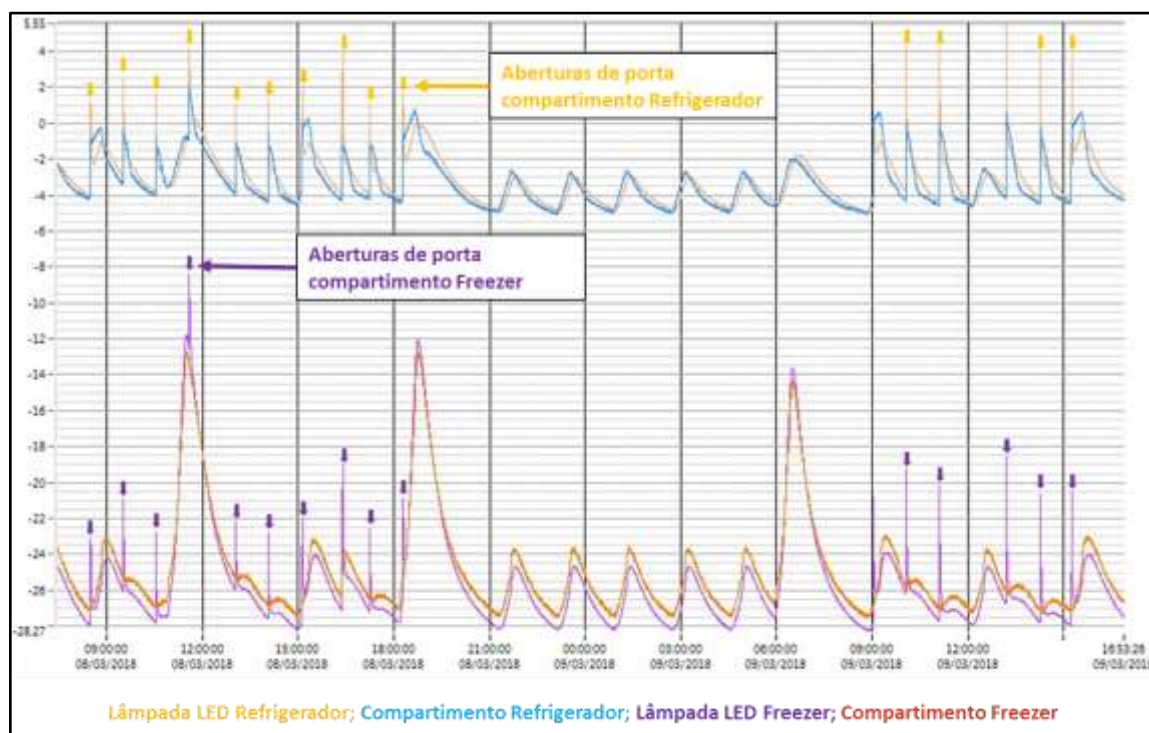
Fonte: Autoria própria.

O mecanismo de falha predominante, cujo efeito é a lâmpada apagar repentinamente, é a desconexão ou rompimento do fio de ouro com o ponto de solda interno do LED, porém antes da análise ter prosseguido como mostrado na Fotografia 4.6, uma série de análises no circuito eletrônico foram realizadas afim de verificar a possibilidade de haver falhas em outros componentes, que poderia apresentar o mesmo efeito encontrado, das lâmpadas apagarem quando expostas em baixas temperaturas.

Para compreender a variação térmica existente dentro da lâmpada LED, um refrigerador foi submetido a condições normais de uso, temperatura de freezer e refrigerador ajustado na regulagem “máximo” e com realizações de aberturas de portas para o acendimento das respectivas lâmpadas LED. Dentro das lâmpadas LED, foi instalado um termopar no módulo de LED como recomenda o anexo B da

portaria 389 do INMETRO, medição *In Situ* da temperatura T_b , temperatura do módulo LED, como comentado no capítulo 2. O resultado dessa verificação é mostrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Ciclo térmico no compartimento do refrigerador, freezer e interno as lâmpadas LED com e sem aberturas de portas



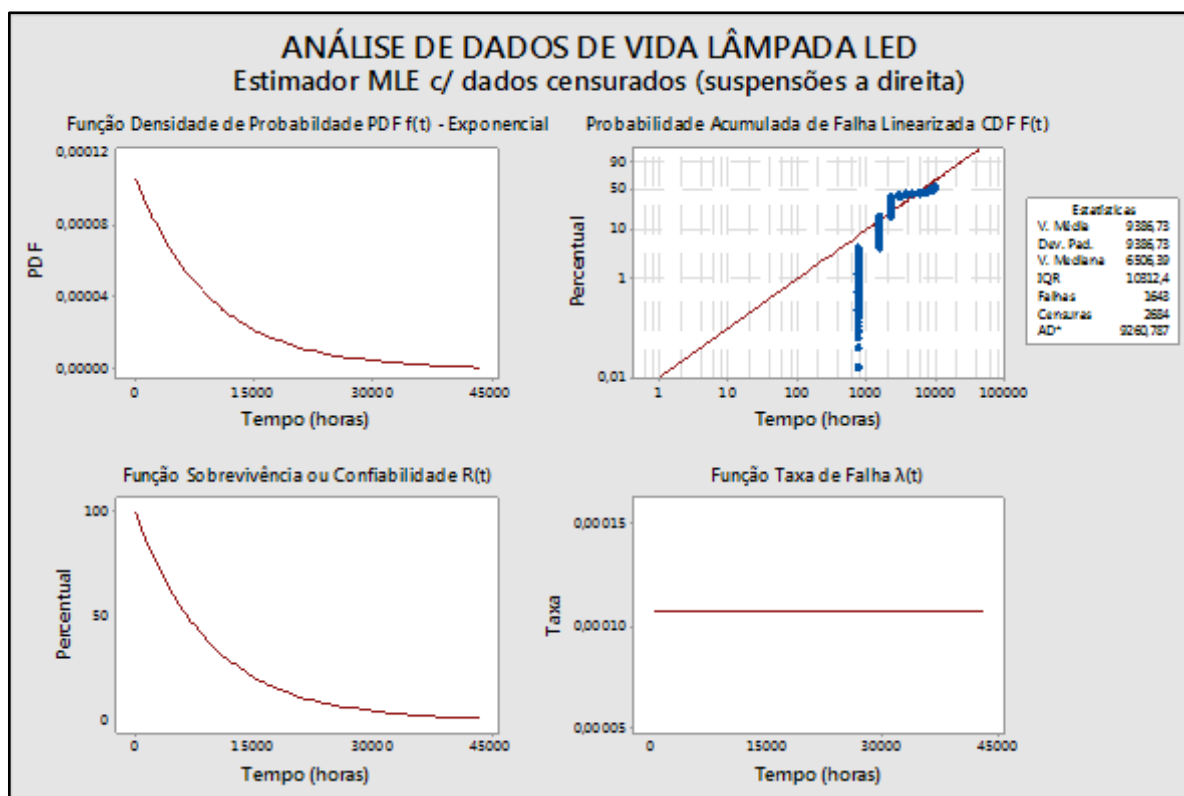
Fonte: Autoria própria.

A Figura 4.18 mostra o ciclo térmico da condição de uso do produto nos compartimentos refrigerador e freezer e as variações térmicas recorrentes das aberturas de porta pelo usuário, e não tem como objetivo medir a quantidade de aberturas de portas realizadas. É possível observar que as lâmpadas LED sofrem diferentes variações térmicas ao longo do tempo, fruto da condição normal de ciclagem térmica do produto e se intensifica quando o usuário realiza aberturas de porta, provocando picos de aumentos de temperatura no módulo LED. Os picos de temperatura, fruto do acendimento da lâmpada LED devido a abertura de porta, aumenta quando o usuário permanece com a porta aberta no decorrer do tempo e estabiliza aproximadamente em 20 minutos.

Nas análises de retorno de campo ficou evidenciado que as falhas nas lâmpadas LED ocorrem com mais frequência no compartimento do freezer, onde as variações térmicas acontecem em torno de -25°C , diferentemente do compartimento do refrigerador onde as variações estão em torno de 0°C , portanto quanto menor for a temperatura do compartimento no qual a lâmpada está instalada, maior será o estresse para o modo ou mecanismo de falha encontrado.

Como observado na Figura 4.18 e informado em G1 Globo (2018), as lâmpadas LED não funcionam de forma contínua no produto refrigerador, mas sim somente quando solicitadas por meio de aberturas de portas, regime intermitente de funcionamento, portanto os dados coletados das peças retornadas de campo (tempo até a falha), Tabela A4 do Apêndice A, foram considerados para esta condição de uso e os resultados obtidos são mostrados na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Análise LDA lâmpadas LED



Fonte: Autoria própria.

Pelos gráficos obtidos na Figura 4.19, é possível observar a função densidade de probabilidade PDF, a probabilidade acumulada de falha linearizada CDF, a função sobrevivência, ou seja, a confiabilidade e a função taxa de falha.

A distribuição que melhor se ajustou aos dados foi a exponencial, portanto a falha possui um comportamento aleatório, com taxa de falha constante. A Figura 4.20 apresenta os resultados das métricas da confiabilidade.

Figura 4.20 – Métricas da confiabilidade LDA lâmpadas LED

Percentiles (Life BX)					Survival Probabilities (Reliability)			
Percent	Percentile	Standard Error	90,0% Normal CI		Time	Probability	90,0% Normal CI	
			Lower	Upper			Lower	Upper
0,01	0,938720	0,0231589	0,901390	0,977596	720	0,926164	0,923227	0,928993
0,1	9,39143	0,231693	9,01796	9,78037	1440	0,857780	0,852347	0,863029
1	94,3398	2,32743	90,5882	98,2468	2160	0,794445	0,786910	0,801748
2	189,637	4,67848	182,096	197,491	2880	0,735786	0,726496	0,744818
3	285,912	7,05365	274,542	297,753	4320	0,631142	0,619227	0,642800
4	383,185	9,45344	367,947	399,054	5040	0,584541	0,571686	0,597157
5	481,476	11,8784	462,329	501,416	5760	0,541381	0,527796	0,554754
6	580,808	14,3289	557,711	604,862	6480	0,501407	0,487275	0,515363
7	681,202	16,8057	654,112	709,413	7200	0,464386	0,449866	0,478769
8	782,681	19,3093	751,556	815,095	7920	0,430097	0,415328	0,444773
9	885,269	21,8402	850,064	921,932	8640	0,398340	0,383442	0,413191
10	988,991	24,3991	949,661	1029,95	8760	0,393280	0,378371	0,408150
20	2094,59	51,6749	2011,29	2181,33	9360	0,368829	0,354003	0,383852
30	3348,01	82,5977	3214,87	3486,67	15000	0,202301	0,189346	0,215574
40	4794,98	119,236	4604,30	4993,56	20000	0,118758	0,108728	0,129259
50	6506,39	160,517	6247,64	6775,84	25000	0,069715	0,062435	0,077504
60	8600,98	212,192	8258,94	8957,18				
70	11301,4	278,813	10851,9	11769,4				
80	15107,4	372,709	14506,6	15733,0				
90	21613,7	533,226	20754,2	22508,5				
91	22602,7	557,625	21703,9	23538,8				
92	23708,3	584,901	22765,5	24690,2				
93	24961,8	615,824	23969,1	25995,5				
94	26408,7	651,521	25358,5	27502,4				
95	28120,1	693,743	27001,9	29284,7				
96	30214,7	745,418	29013,2	31466,0				
97	32915,1	812,039	31606,2	34278,3				
98	36721,1	905,935	35260,8	38241,9				
99	43227,5	1066,45	41508,5	45017,7				

Characteristics of Distribution				
	Estimate	Standard Error	90,0% Normal CI	
			Lower	Upper
Mean (MTTF)	9386,73	231,577	9013,45	9775,48
Standard Deviation	9386,73	231,577	9013,45	9775,48
Median	6506,39	160,517	6247,64	6775,84
First Quartile (Q1)	2700,39	66,6206	2593,01	2812,23
Third Quartile (Q3)	13012,8	321,034	12495,3	13551,7
Interquartile Range (IQR)	10312,4	254,413	9902,28	10739,5

Fonte: Autoria própria.

Com os dados obtidos pelo software Minitab, é possível determinar de imediato as principais métricas da confiabilidade como mostrado na Figura 4.20. A taxa de falha e a confiabilidade condicional foram calculadas conforme equações 4.1 e 4.2 respectivamente para a distribuição exponencial e o resultado é mostrado no Quadro 4.5.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{MTTF} = \lambda \text{ (Constante)} \quad 4.1$$

$$R(t'|t) = \frac{R(t+t')}{R(t)} = \frac{e^{-\lambda(t+t'-\gamma)}}{e^{-\lambda(t-\gamma)}} = e^{-\lambda t'} \quad 4.2$$

Quadro 4.5 – Métricas da confiabilidade das análises LDA lâmpadas LED

Métricas	Resultado LDA (Campo)	Unidade ou Percentual	Meio de Cálculo
MTTF	9386,73	horas	Minitab
Desvio Padrão	9386,73	-	Minitab
Vida Mediana	6506,39	horas	Minitab
Vida B10	988,991	horas	Minitab
Vida B50	6506,39	horas	Minitab
Vida B90	21613,7	horas	Minitab
R(720 horas)	92,6164	%	Minitab
R(8760 horas)	39,328	%	Minitab
R(25000 horas)	6,9715	%	Minitab
λ (720 horas)	0,0001065	falhas/hora	Calculado equação 4.1
λ (8760 horas)	0,0001065	falhas/hora	Calculado equação 4.1
λ (25000 horas)	0,0001065	falhas/hora	Calculado equação 4.1
R (720 8760 horas)	39,3395	%	Calculado equação 4.2
R (8760 25000 horas)	6,9774	%	Calculado equação 4.2

Fonte: Autoria própria.

Referente a equação 4.1, Reliasoft (2015) descreve que “a taxa de falha constante é uma característica da distribuição exponencial e casos especiais de outras distribuições apenas. A maioria das outras distribuições tem taxas de falha que são funções do tempo”.

Referente a equação 4.2, Reliasoft (2015) descreve que “a confiabilidade para uma missão de duração t realizada após o componente ou equipamento já ter acumulado t horas de operação a partir da idade zero é apenas uma função da duração da missão, e não uma função da idade no início da missão. Isso é chamado de propriedade sem memória”.

4.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4

Os ensaios acelerados de vida QALT foram realizados nas lâmpadas incandescentes 127V e 220V, onde foi utilizado dois relacionamentos vida estresse, o T-NT (Lâmpada incandescente 127V) e o IPL (Ambas lâmpadas incandescentes) e avaliado as influências dos stressamentos sob o comportamento e o mecanismo da falha e a confiabilidade. Avaliações do comportamento e mecanismos de falha e confiabilidade também foram possíveis de fazer para as lâmpadas LED por meio de

análises de causa raiz RCA e análise de dados de vida LDA, pois os dados de vida de campo estavam disponíveis. Os resultados obtidos nos ensaios QALT e em análises RCA e LDA são significativos para compreender os mecanismos de falha predominantes envolvidos durante as condições de uso de ambas as lâmpadas, incandescente e LED, e também como estes mecanismos de falha se comportam e interferem na confiabilidade, na vida do componente. O capítulo 5 descreve a síntese dos resultados obtidos, os comparativos dos comportamentos de vida das lâmpadas incandescentes e LED com as respectivas referências normativas e demais literaturas relacionadas, as dificuldades, desafios e soluções encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo sintetiza os resultados obtidos e estabelece os comparativos dos comportamentos de vida das lâmpadas incandescentes e LED, ensaiadas conforme metodologia apresentada no capítulo 4.

As análises de confiabilidade realizadas em lâmpadas incandescentes e LED mostrou que os conceitos e técnicas estatísticas de análises de dados de vida quando combinados e utilizadas de forma adequada, obtém-se o conhecimento da vida estimada em probabilidades dos produtos de forma geral. Com os dados obtidos é possível compreender de que forma os mecanismos de falha atuam no produto, quais os estressamentos que mais contribuem para a diminuição da confiabilidade, possibilita tomar decisões técnicas importantes no desenvolvimento de novos projetos, assim como contribui para tomadas de decisões comerciais, como escolher o melhor fornecedor, traçar a melhor estratégia de *share*, definir o tempo de garantia e demais outras relacionadas com o custo do projeto no pós-venda. Conforme o trabalho proposto, análise de confiabilidade baseado em ensaios acelerados de vida, foi observado as relações existentes entre as influências dos estressamentos térmicos e não térmicos na lâmpada incandescente, e, portanto, os resultados obtidos nos ensaios QALT (*Quantitative Analysis Life Test*) possuem semelhanças muito próximas do que a referência normativa propõe.

Para compreender o tipo de carregamento de estresse significativo que provoca o mecanismo de falha conhecido na lâmpada LED, foi sugerido a realização dos ensaios qualitativos do tipo HALT (*Highly Accelerated Life Test*), o que permite também conhecer quais são os níveis de estressamentos destrutivos para que um bom delineamento de ensaio do tipo QALT seja feito. Diante da impossibilidade de realização do ensaio do tipo HALT, devido dificuldades de captação de recursos financeiros para contratação de um laboratório especializado, as análises de confiabilidade foram realizadas com base nas informações de dados de campo (tempos até a falha), por meio da análise de dados de vida LDA (*Life Data Analysis*), e, portanto, os resultados obtidos foram divergentes da referência normativa e da especificação de vida proposta em *datasheet*.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS E REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Por meio de análises de QALT as métricas da confiabilidade de lâmpadas incandescentes puderam ser conhecidas e comparadas com a norma NBR 14671. As lâmpadas LED tiveram de ser comparadas com os dados do *datasheet* do fabricante, pois o modelo de distribuição de vida encontrado durante análises de LDA mostrou um comportamento exponencial, típico de circuitos eletrônicos, que não reflete os modos de falhas previstos na portaria 389 do INMETRO.

5.1.1 Resultado obtido lâmpadas incandescentes e a norma NBR 14671

Os ensaios acelerados de vida realizados em lâmpadas incandescentes 127V e 220V, teve como ponto de partida a referência normativa NBR 14671. É possível calcular os tempos de teste das lâmpadas 127V e 220V por meio da equação 2.2, sendo que na tensão de teste acelerado equivalente a 110% da tensão nominal, as lâmpadas 127V e 220V assumem respectivamente a uma vida acelerada de 217,3 e 289,7 horas considerando que as mesmas contêm em seus bulbos o vácuo ao invés de gás inerte. Na norma, o ensaio só finaliza na condição de 125% da vida nominal, 937,5 horas para lâmpada 127V e 1250 horas para lâmpada 220V, portanto na tensão de teste os tempos encontrados por meio da equação 2.2 para as lâmpadas 127V e 220V são recalculados para 272 e 362 horas respectivamente. Nestes períodos em que o ensaio é realizado, na condição de teste acelerado, é permitido até no máximo 5 não conformidades (falhas) para uma amostra de 35 lâmpadas, ou seja 14,3% de falhas. As métricas da confiabilidade obtidas durante o ensaio acelerado de vida QALT para o período de 272 e 362 horas de ensaio definidos pela norma NBR 14671, referentes as lâmpadas 127V e 220V respectivamente, podem ser visualizados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Confiabilidade na condição do teste acelerado de vida da NBR14671

Lâmpada 127V						Lâmpada 220V					
Table of Percentiles (Life Bx)						Table of Percentiles (Life Bx)					
Percent	TENSÃO	Percentile	Standard Error	80,0% Normal CI		Percent	TENSÃO	Percentile	Standard Error	80,0% Normal CI	
				Lower	Upper					Lower	Upper
10	103	16914,5	2733,20	13750,7	20806,3	10	198	3113,86	3120,98	861,897	11249,7
10	127	1060,97	103,083	936,761	1201,66	10	220	1078,03	792,486	420,229	2765,54
10	140	292,541	30,8234	261,036	320,483	10	242	612,962	204,783	218,732	779,664
50	103	24239,5	3842,94	19782,7	29700,3	50	198	5510,20	5595,54	1499,60	20246,9
50	127	1520,44	136,631	1355,05	1706,02	50	220	1907,66	1423,51	732,936	4965,19
50	140	419,229	24,8775	388,530	452,355	50	242	730,765	368,070	383,218	1393,51
90	103	30486,6	4870,51	24842,3	37413,3	90	198	7927,36	8163,30	2119,33	29666,4
90	127	1912,29	173,330	1702,57	2147,83	90	220	2744,50	2090,19	1034,14	7293,56
90	140	527,273	31,4000	488,530	569,090	90	242	1051,33	547,165	539,600	2048,36
Table of Survival Probabilities (Reliability)						Table of Survival Probabilities (Reliability)					
Time	TENSÃO	Probability	80,0% Normal CI		Time	TENSÃO	Probability	80,0% Normal CI			
			Lower	Upper				Lower	Upper		
272	103	1,00000	1,00000	1,00000	362	198	0,999913	0,992487	1,00000		
272	127	0,99992	0,99972	0,99997	362	220	0,997131	0,931697	0,99988		
272	140	0,93056	0,88782	0,95740	362	242	0,934061	0,571571	0,99173		
750	103	1,00000	1,00000	1,00000	1000	198	0,997523	0,836767	0,99997		
750	127	0,98301	0,96427	0,99196	1000	220	0,921071	0,158777	0,99633		
750	140	0,00000	0,00000	0,00012	1000	242	0,142003	0,000000	0,80369		
8760	103	0,99664	0,98871	0,99901	8760	198	0,040691	0,000000	0,86053		
8760	127	0,00000	0,00000	0,00000	8760	220	0,000000	0,000000	0,05201		
8760	140	0,00000	0,00000	0,00000	8760	242	0,000000	0,000000	0,00000		

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 5.1 que no tempo de 272 horas, para lâmpada incandescente 127V, a probabilidade acumulada de falha é de 6,9%, calculado conforme equação 3.3. Para lâmpadas incandescentes 220V, esta probabilidade acumulada de falha é de 6,6%. As probabilidades acumuladas de falha são numericamente semelhantes, porém ao considerar os intervalos de confiança para um nível de confiança de 80%, a lâmpada incandescente 127V possui uma probabilidade acumulada de falha variável entre 4,3% a 11,2% e a lâmpada incandescente 220V possui uma probabilidade acumulada de falha variável entre 0,8% a 42,8%. Portanto, para as condições aos quais os ensaios foram realizados, a lâmpada incandescente 127V possui uma variação de probabilidade acumulada de falha absorvida pela especificação da norma NBR 14671 (admite 5 falhas em uma amostragem de 35 peças no ensaio), com chances de 1,5 a 4 peças virem a falhar, enquanto as lâmpadas 220V tem uma expressiva variação nas probabilidades acumuladas de falha, com chances de 0,3 a 15 peças virem a falhar.

As diferenças nas probabilidades acumuladas de falha encontradas entre as lâmpadas incandescentes 127V e 220V quando considerados os intervalos de confiança, é resultado direto da forma como os ensaios foram conduzidos. O ensaio IPL realizado para lâmpada incandescente 127V teve 3 níveis de estressamento de tensão, 180V, 165V e 150V e os dados utilizados na análise foram completos, ou

seja, todas as amostras falharam, enquanto a lâmpada incandescente 220V foi usado 2 níveis de estressamento de tensão, 300V e 285V e os dados foram censurados, dados incompletos com suspensões a direita. As diferenças entre o maior e o segundo maior nível de estressamento em comparação ao nível da condição de uso também fez a diferença, enquanto para lâmpadas 127V a diferença do maior nível foi de 53V (180V – 127V), nas lâmpadas 220V a diferença do maior nível foi de 80V (300V – 220V), já o segundo maior nível utilizado no ensaio em comparação ao nível da condição de uso foi de 38V (165V – 127V) para a lâmpada incandescente 127V e 65V (285V – 220V) para a lâmpada 220V. É sabido que quanto mais níveis de estressamento o ensaio tiver, quanto menor for a diferença dos níveis de estressamento em comparação ao nível da condição de uso e que se o ensaio apresentar dados completos ao invés de censuras do tipo suspensões a direita, menor será o erro e a incerteza no resultado final da extrapolação pra a condição de uso ou para a condição que se deseja avaliar, que neste caso é a comparação com a norma NBR 14671 na tensão de teste igual 110% da tensão nominal. Portanto é possível afirmar que, em linhas gerais, considerando apenas os valores nominais das probabilidades acumuladas de falha, as lâmpadas 127V e 220V atendem de certa forma os requisitos da norma NBR 14671.

A vantagem de realizar o ensaio por meio do QALT, é a possibilidade de conhecer as variações probabilísticas e as métricas da confiabilidade, que pode ajudar a redefinir projetos, tomar decisões importantes em situações onde há a possibilidade de reduções de custos de projeto, estimar e readequar políticas de garantia e até mesmo pós garantia, ou seja, para aquelas empresas e fabricantes que tem como políticas de qualidade e marketing, fidelizar a marca com seus clientes e consumidores por longos períodos de tempo, ou seja, marcas com características mais conservadoras.

5.1.2 Resultado obtido lâmpada LED e a portaria 389 do INMETRO

A portaria 389 do INMETRO, como visto no capítulo 2, é taxativa com relação a vida útil do LED e trata-o como um componente semicondutor que degrada devido a exposição de funcionamento em altas temperaturas, além de prever ensaios do circuito eletrônico, mais específico em capacitores eletrolíticos.

A proposta inicial do trabalho era delinear ensaios acelerados de vida QALT com intuito de confrontar os resultados com a referência normativa, portaria 389 do INMETRO, igualmente como foi feito para lâmpada incandescente, e, ao mesmo tempo reproduzir os modos de falhas encontrados no campo por meio de um ensaio qualitativo do tipo HALT, onde seria possível encontrar rapidamente os elos mais fracos e os mecanismos de falha latentes a lâmpada LED e por fim, definir o nível e o tipo de estressamento que poderia ser considerado para modelar o ensaio QALT. Todas estas sequências de análises não puderam ser realizadas, porém os dados de vida coletados de campo e as análises dos mecanismos de falha realizadas por meio dos conceitos de RCA, foram determinantes para a realização da análise de dados de vida LDA, o que foi possível estimar a confiabilidade das lâmpadas LED selecionadas como objeto de estudo deste trabalho. O comportamento do modo de falha encontrado na lâmpada LED foi de natureza exponencial, com taxa de falha constante. Em Reliasoft (2015), a distribuição exponencial é considerada “um caso especial da distribuição Weibull onde $\beta=1$. A distribuição exponencial é usada para modelar o comportamento de unidades que possuem uma taxa de falha constante (ou unidades que não se degradam com o tempo ou se desgastam)”. Em Reliability Analytics Tool Kit (2018), “a distribuição exponencial é frequentemente usada para modelar a confiabilidade de sistemas eletrônicos, que normalmente não experimentam falhas do tipo *wearout*”. Em outras palavras, comportamentos de vida aleatórios não tem como característica um modo de falha do tipo desgaste ou degradação.

A lâmpada LED, como visto no capítulo 2, é formada por diversos componentes eletrônicos distribuídos em um circuito eletrônico (*driver*) e um módulo de LED formado por um ou mais semicondutores LED, que juntos formam um sistema não-reparável. Para compreender o mecanismo de falha é necessário verificar se as principais informações contidas no *datasheet*, Quadro 5.1, tem algum efeito sobre a falha.

Quadro 5.1 – Principais informações do *datasheet* da lâmpada e diodo LED

<i>Datasheet</i>	Especificação	Simbologia	Valor Máximo Absoluto	Unidade
Lâmpada LED	Vida B50	B50	25.0000	horas
	Ciclos de chaveamento	Csw	200.000	ciclos
	Tensão Entrada AC	Vin	85 a 265	Vac
	Frequência Entrada AC	Fr	50 e 60	Hz
Diodo LED	Temperatura de Operação	Topr	-40 a 105	°C
	Temperatura de Junção	Tj	125	°C
	Resistência Térmica	Rth	20	°C/W
	Potência Dissipada	Pd	0,96	W

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a equação 2.1 e as medições das ciclagens térmicas realizadas no interior da lâmpada LED (temperatura do módulo de LED) como mostrado na Figura 24, torna-se possível calcular a temperatura de junção para cada condição térmica do regime de funcionamento da lâmpada LED instalada no compartimento freezer e refrigerador como mostra o Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Análise térmica das temperaturas de junção do LED

Condição		Local de Medição Topr / Calculado Tj						Unidade
Posição térmica de operação do LED	Período com Degelo?	Topr do LED Refrigerador	Tj do LED Refrigerador	Topr do LED Freezer	Tj do LED Freezer	Delta Tj Refrigerador	Delta Tj Freezer	
Maior temperatura atingida pelo LED	SIM	4	23,2	-8	11,2	3	15,5	°C
Menor temperatura atingida pelo LED		1	20,2	-23,5	-4,3			
Maior temperatura atingida pelo LED	NÃO	4	23,2	-18,5	0,7	0	2	°C
Menor temperatura atingida pelo LED		4	23,2	-20,5	-1,3			
Maior temperatura atingida pelo LED	SIM	4	23,2	-8	11,2	28,2	39,47	°C
Temperatura de estabilização LED desligado		-5	-5	-28,27	-28,27			
Maior temperatura atingida pelo LED	NÃO	4	23,2	-18,5	0,7	28,2	28,97	°C
Temperatura de estabilização LED desligado		-5	-5	-28,27	-28,27			

Fonte: Autoria própria.

É possível observar no Quadro 5.2 que as temperaturas de junções estão bem abaixo do especificado pelo fabricante, 125°C.

A portaria 389 do INMETRO, especificamente a LM-80-08, descreve que o ensaio de vida leva em consideração no mínimo três temperaturas de teste, 55°C,

85°C e uma outra definida pelo fabricante, e exalta que o comportamento esperado das falhas deverá ser do tipo desgaste ou depreciação do fluxo luminoso, diferentemente do que é observado no campo e o que caracteriza de fato como um comportamento do tipo “sem memória”, exponencial.

Para compreender melhor o funcionamento das lâmpadas LED nos produtos aos quais estão instaladas, é necessário entender a lógica por trás das aberturas de porta. A lógica de funcionamento das lâmpadas LED tem como característica de projeto, o acendimento das duas lâmpadas LED simultaneamente, independente de qual porta do produto for aberta, portanto se somente a porta do refrigerador for aberta (exemplo mostrado na Figura 24), as duas lâmpadas LED, inclusive a instalada no compartimento freezer irá acender e vice-versa. No perfil térmico da Figura 24, somente a porta do refrigerador foi aberta durante as avaliações térmicas, e portanto, foi possível observar que o compartimento do freezer, mesmo sendo o menos utilizado no dia a dia, é mais susceptível a variações térmicas que o compartimento refrigerador, tanto em operação (lâmpada ligada) como fora de operação (lâmpada desligada), pois este compartimento sofre influências do degelo do produto, que faz aquecer o ambiente em vários períodos do dia, e que, quando combinados com o mesmo momento de abertura de porta do refrigerador, faz a temperatura em cima do LED variar mais do que no compartimento do refrigerador. Se aberturas de portas forem realizadas no compartimento do freezer, pela lógica as variações térmicas no LED poderão ser maiores e mais significativas.

Uma outra questão que deve ser levada em consideração é a quantidade de aberturas de portas realizadas no produto, independente de qual porta for. Pela lógica, quanto mais aberturas de porta forem realizadas, mais haverá a presença de acúmulo de gelo devido a entrada de umidade do ambiente ao qual o produto se encontra, por este motivo mais rotinas de degelo irá acontecer para o produto cumprir uma de suas principais funções, que é fazer o degelo do evaporador que o caracteriza como um produto *frost free*, conseqüentemente mais rotinas de mudança de temperatura T_j ocorrerá no LED dentro da lâmpada LED.

Baixas temperaturas podem causar falha nos componentes, geralmente devido a mudanças paramétricas nas características elétricas. Os limites típicos de baixa temperatura para a maioria dos componentes são -20°C a -60°C . No entanto, essas falhas geralmente são reversíveis e a função correta é recuperada se a temperatura aumentar. Mudanças de temperatura repetidas podem ser mais prejudiciais do que a operação contínua em altas temperaturas. As mudanças de temperatura também causam danos por fadiga e deformação das junções de solda em componentes eletrônicos montados na superfície (O'CONNOR; KLEYNER, 2012, p. 229).

As baixas temperaturas associadas às mudanças de temperaturas repetidas ao longo do tempo, muito provavelmente estão associadas aos mecanismos de falhas encontrados nas amostras coletadas de campo. Como solução para os problemas encontrados no campo, de posse dos resultados obtidos referentes as análises de LDA, o fabricante do produto refrigerador tomou a decisão de substituir o fornecedor de lâmpadas LED do compartimento do freezer, porém mantendo-o no compartimento refrigerador. Esta ação de melhoria por meio de troca de fornecedores de lâmpadas LED, acabou justificando a não realização dos ensaios HALT e conseqüentemente o modelamento de um ensaio QALT. Uma tentativa de realização dos ensaios HALT com fornecedor da lâmpada LED foi feita, porém o mesmo justificou que variações no processo de fabricação do fabricante de LEDs foi identificada e propostas as melhorias, portanto os novos LEDs estão sendo produzidos. O fornecedor da lâmpada LED foi questionado novamente sobre a realização de HALT para os novos LEDs, porém não foi possível a realização dos ensaios até o período de entrega deste trabalho.

5.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

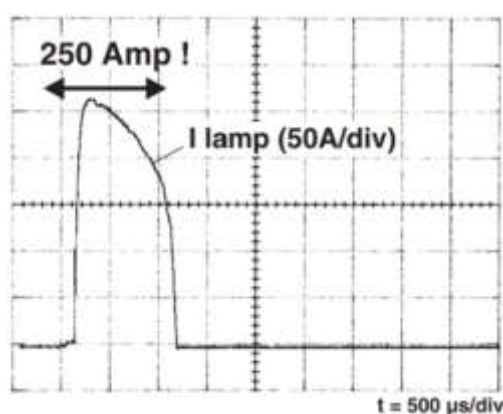
As dificuldades técnicas surgiram durante a construção da bancada de teste e a realização de ensaios de vida qualitativos do tipo HALT (*Highly Accelerated Life Test*), porém em questões mais corporativas fica evidente que grandes empresas fabricantes e desenvolvedores de produtos, se quiserem atingir ótimos níveis de satisfação do consumidor, tendo como objetivo a redução do índice de chamadas de campo e conseqüentemente custos, devem possuir um corpo de engenharia engajado e conhecedor dos assuntos que envolvem os conceitos de engenharia da confiabilidade, principalmente análise de dados de vida LDA. Os ensaios acelerados de vida QALT devem ser intensamente utilizados durante a fase de projeto para que

se tenha conhecimento desde o início das métricas da confiabilidade, para que os custos financeiros com garantia possam ser previstos com mais precisão e com margens de erros conhecidos, e para isso investimentos deverão ser realizados como parte de um planejamento anterior, durante as discussões de custos envolvidos de um novo projeto.

5.2.1 O efeito *flashover* na bancada de testes

Durante o desenvolvimento do projeto da bancada de testes, houve a necessidade de revisar todo o projeto do circuito de medição de corrente elétrica devido ao efeito conhecido como *flashover*. No final da vida das lâmpadas incandescentes, no período de tempo que antecede a queima, o filamento de tungstênio apresenta resistências ôhmicas próximas de um curto circuito, o que permite um aumento excessivo da corrente elétrica que circula pelo circuito de medição da bancada de teste, o que causa queima dos resistores do tipo *shunt* utilizados para fazer medições de corrente elétrica.

Figura 5.2 – Efeito *flashover* em lâmpadas incandescentes



Fonte: STMicroelectronics (2006).

Em STMicroelectronics (2006), o exemplo típico de sobre corrente (*flashover*) mostrado na Figura 5.2 pertence a uma lâmpada incandescente de 25W.

O efeito *flashover* permitiu evidenciar a evolução do processo de degradação, envelhecimento e o que realmente ocorre na prática quando a lâmpada incandescente queima. Os eventos de *flashover* foram possíveis de serem vistos por

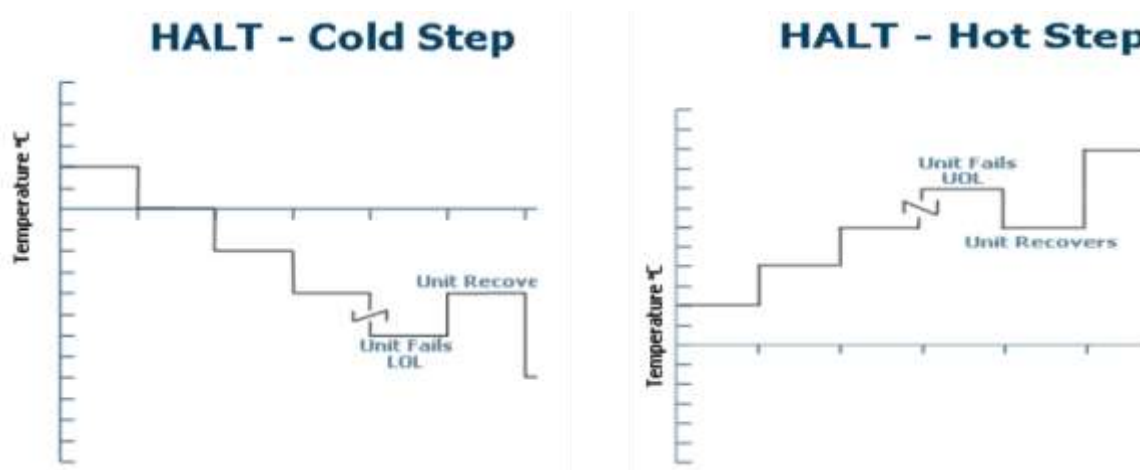
meio do uso de um osciloscópio com ponta de medição de corrente em diversos testes aleatórios de aprovação da bancada de testes, com níveis de corrente menores como o apresentado na Figura 5.2, porém suficientes para queimar o circuito de medição da bancada de teste. A solução foi fazer a substituição destes resistores *shunts* por outros com potências mais elevadas e que suportam correntes maiores, além de cada posto de teste receber fusíveis. O circuito de medição da bancada teve alterações adicionais no que diz respeito a tensão de isolamento, rigidez dielétrica, pois os ensaios acelerados de vida que utilizam a relação vida estresse IPL é feito com tensões bastante elevadas, podem chegar acima de 300V para lâmpadas ou demais outros componentes que possuem tensão de alimentação nominal de 220V.

5.2.2 O ensaio qualitativo altamente acelerado - HALT

Devido ao mecanismo de falha encontrado nas lâmpadas LED, o ensaio HALT foi proposto no início do trabalho como uma alternativa para compreender de que maneira a falha ocorre e quais os elos fracos existentes no projeto da lâmpada, mais especificamente o projeto do componente semicondutor LED.

Os ensaios HALT não puderam ser realizados para este trabalho, pois os recursos exigidos para este fim não foram atendidos. Não foi possível a contratação de laboratório especializado, que possui os equipamentos e a câmara HALT, e não houve interesse, por parte do fabricante da lâmpada LED, em realizar o ensaio, assim sendo não foi possível determinar o nível de estressamento destrutivo (temperatura e vibração). As Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 descrevem os perfis térmicos e de vibração dos ensaios HALT propostos ao fabricante da lâmpada LED.

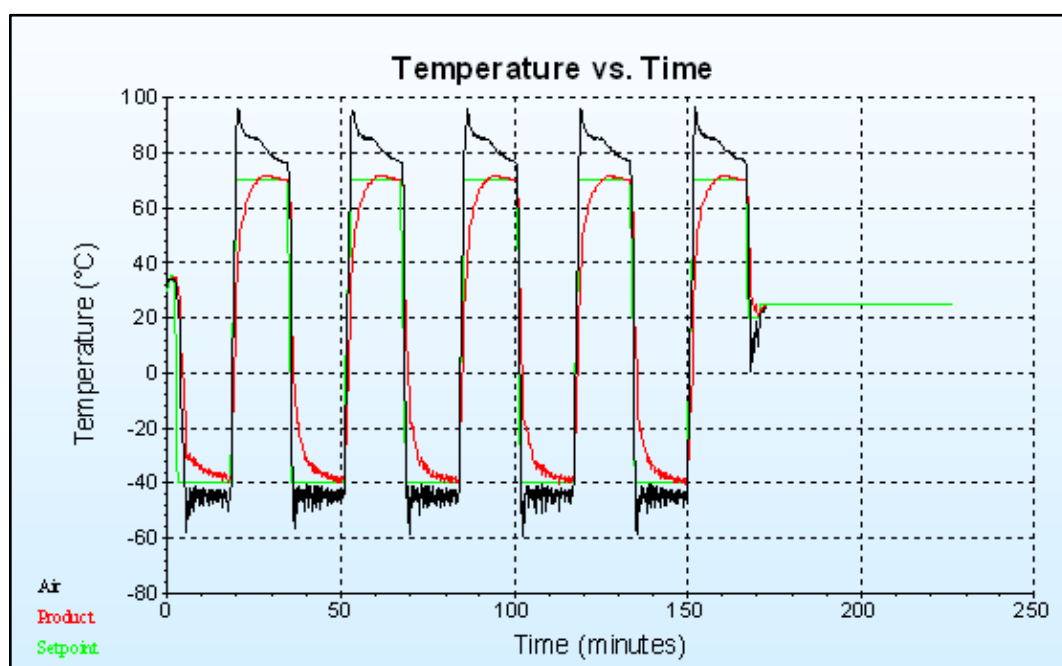
Figura 5.3 – Estressamento por passos de temperatura



Fonte: Adaptado apostila de treinamento em HALT – Koeche (2014).

A temperatura inicial de teste sugerida foi de 20°C com passos de 10°C, para temperaturas mais altas, quanto para temperaturas mais baixas. O tempo de estabilização térmica proposto em cada passo foi de 10 minutos e na sequência a realização de testes funcionais.

Figura 5.4 – Transições rápidas de temperatura



Fonte: Apostila de treinamento em HALT – Koeche (2014).

As faixas de temperaturas de teste sugerida foi de -30°C a $+40^{\circ}\text{C}$, como descrito no *datahseet* do fabricante do LED, após incrementos de -10°C no limite mais baixo da temperatura e incrementos de $+10^{\circ}\text{C}$ no limite mais alto da temperatura, sucessivamente até a destruição. Para cada limite de temperatura, mais alto e mais baixo, foi proposto uma estabilização térmica de 10 minutos e na sequência a realização de testes funcionais.

Demais ensaios foram solicitados, como estressamento por passos de vibração e ensaios térmicos combinados com vibração, porém é sabido que a lâmpada LED sofre mais influências térmicas do que vibracionais, haja vista que a concentração das falhas analisadas durante a análise RCA foram significativamente maiores no compartimento do freezer do que no compartimento do refrigerador do produto, onde as temperaturas ambientes estão em torno de -30°C , enquanto as temperaturas do refrigerador estão em torno de 0°C , portanto o foco foi a tentativa de realizar os ensaios propostos nas Figuras 5.3 e 5.4 primeiramente e se as análises não fossem conclusivas, os estressamentos por vibração poderiam ser solicitados.

Os testes funcionais propostos respeitariam o regime de funcionamento do tipo intermitente (*ON / OFF*), com estabilizações térmicas como na condição de uso, ou seja, a lâmpada somente liga (acende) quando existem aberturas de portas, porém o regime contínuo também poderia ser realizado para efeitos comparativos.

O HALT foi sugerido para verificar a possibilidade de identificar o mesmo modo de falha encontrado no campo em um período muito curto de tempo, talvez em alguns minutos ou algumas horas, para sim possivelmente determinar um ensaio acelerado de vida QALT por meio dos limites térmicos destrutivos conhecidos, com intuito de extrair as métricas da confiabilidade e compará-las com os resultados obtidos nas análises de dados de vida LDA por meio de gráficos de contorno, comparação campo com bancada.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Pudemos evidenciar neste trabalho que os diodos LED apresentam comportamentos de falhas do tipo exponencial, ou seja, com taxa de falha

constante, muito comum em sistemas eletrônicos, porém as referências normativas tratam o diodo LED como um semicondutor que degrada seu fluxo luminoso no decorrer do tempo, o que caracteriza um comportamento de desgaste ou degradação durante a sua vida útil, ao longo das 15000 horas como especificado na portaria 389 do INMETRO ou 25000 horas como especificado no *datasheet* da lâmpada LED como mostra o Quadro 5.1.

Para trabalhos futuros recomenda-se estudar com mais afinco os mecanismos de falhas existentes em circuitos eletrônicos, do ponto de vista da confiabilidade, entender como e de que maneira os mecanismos de falhas se relacionam e atuam no sistema eletrônico como um todo, identificar quais variações possíveis envolvidas no sistema e como conviver com os comportamentos exponenciais de vida. Pesquisar e propor novos métodos e técnicas de análises para que haja um controle maior sobre os comportamentos das falhas e o quão isso pode contribuir para o aumento da confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- O'CONNOR, Patrick D. T.; KLEYNNER, Andre. **Practical Reliability Engineering**. 5. ed.: Wiley, 2012.
- PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Confiabilidade, A Quarta Dimensão Da Qualidade: Conceitos Básicos e Métodos de Cálculo (Volume 1)**. 1. ed.: Reliasoft Brasil, 2006.
- PALLEROSI, Carlos Amadeu. **Confiabilidade, A Quarta Dimensão Da Qualidade: Ensaio Acelerados (Volume 3)**. 1. ed.: Reliasoft Brasil, 2007.
- RELIASOFT. **Life Data Analysis Reference**. Tucson: Reliasoft Corporation, 2015.
- RELIASOFT. **Accelerated Life Testing Reference**. Tucson: Reliasoft Corporation, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro (RJ), 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14671**: Lâmpadas com filamento de tungstênio para uso doméstico e iluminação geral similar – Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro (RJ), 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Portaria 389**: Regulamento técnico da qualidade para lâmpadas com dispositivo de controle integrado à base. Rio de Janeiro, 2014.
- CONEX LED. **Conheça o LED, história**. Disponível em <http://www.conexled.com.br/sobre/led/historia/>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- PIZUTTI, Eusébio. Disponível em <https://dicasdozebio.com/2015/12/20/filamento-led-conheca-e-compare-parte-1/>. Acesso em: 30 jul. 2018.
- FELICISSIMO, Adriana. Lâmpada Incandescente: A velha senhora que ainda faz sucesso. **Revista Lumen**, São Paulo (SP), ed.8, julho 2004. Disponível em: http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed08/ed_08_aula.pdf. Acesso em: 30 jul. 2018.
- SCOPACASA, Vicente. A. Introdução à Tecnologia de LED. **Revista LA_PRO**, São Paulo (SP), ed.1, novembro 2004. Disponível em: http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/LA_Pro1/02%20-%20pro_leds_Vis%C3%A3o_Geral.pdf. Acesso em: 30 jul. 2018.
- IWASHITA, Juliana. Iluminação Eficiente: **Avaliação de desempenho de LEDs pela LM-80 e LM-79**. Cotia (SP), 2015. Disponível em: <http://www.expersolution.com.br/single-post/2015/06/08/Avalia%C3%A7%C3%A3o-de-desempenho-de-LEDs-pela-LM80-e-LM79>. Acesso em: 30 jul. 2018.

RIGONI, Emerson; MARIANO, Carlos Henrique. **Distribuições aplicadas a confiabilidade**. 3. Parte. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2016.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luiz Duarte. **Confiabilidade e Manutenção industrial**. 1. ed. Rio de Janeiro (RJ): Elsevier, 2009.

SPANÓ, Cláudio Caiani. **Ensaio Acelerados de Vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2017.

YANG, Guangbin. **Life Cycle Reliability Engineering**: Wiley, 2007.

RELIASOFT BRASIL: **RS 401 – Análise de Dados de Vida**. São Paulo (SP), 2008.

MAZZEI, Denis. **Análise do Custo do Ciclo de Vida**. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2015.

KOECHE, Régis. **Treinamento em HALT**. Apostila de treinamento em HALT, Curitiba (PR): 2014.

MAGALHÃES, Ivan Luizio. Disponível em <https://www.linkedin.com/pulse/mtbf-mtbr-mttr-mttf-mtbde-fit-ivan-luizio-magalh%C3%A3es/>. Acesso em: 06 ago. 2018.

G1 GLOBO. **Feira em SP mostra eletrodomésticos que economizam energia**. Julho 2018. Disponível em <http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/07/feira-em-sp-mostra-eletrrodomesticos-que-economizam-energia.html>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MINITAB. **Insira seus dados para teste de vida acelerado**. 2017. Disponível em <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/reliability/how-to/accelerated-life-testing/perform-the-analysis/enter-your-data/>. Acesso em: 20 ago. 2018.

RELIABILITY ANALYTICS TOOLKIT. **Exponential distribution**. Disponível em https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/exponential_distribution. Acesso: em 27 ago. 2018.

STMicroelectronics. **A logic-level transient-voltage protected AC switch**. maio 2006. Disponível em: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/ad/1d/2b/7e/da/15/41/76/CD00004097.pdf/files/CD00004097.pdf/jcr:content/translations/en.CD00004097.pdf. Acesso em: 27 ago. 2018.

APÊNDICE A – DADOS PARA QALT E LDA

Os dados das análises de dados de vida e das análises de ensaios acelerados de vida estão disponíveis nas tabelas A1, A2, A3 e A4.

A tabela A1 refere-se aos dados do ensaio acelerado de vida do tipo T-NT das lâmpadas incandescentes 127V.

Tabela A1 - Dados QALT do tipo T-NT das lâmpadas incandescentes 127V

ENSAIO	TTF (Horas)	TENSÃO (V)	TEMPERATURA (K)
1	10,6	180	298,15
1	11,2	180	298,15
1	11,4	180	298,15
1	11,4	180	298,15
1	11,4	180	298,15
1	11,8	180	298,15
1	12,3	180	298,15
1	12,3	180	298,15
1	12,5	180	298,15
1	12,6	180	298,15
1	12,8	180	298,15
1	13,1	180	298,15
1	13,4	180	298,15
1	13,8	180	298,15
1	13,8	180	298,15
1	14,3	180	298,15
1	15,6	180	298,15
1	15,7	180	298,15
1	16,1	180	298,15
1	16,4	180	298,15
1	16,9	180	298,15
1	17,8	180	298,15
1	20,7	180	298,15
1	22,0	180	298,15
2	31,3	165	298,15
2	31,9	165	298,15
2	38,6	165	298,15
2	38,9	165	298,15
2	39,5	165	298,15

2	43,8	165	298,15
2	45,1	165	298,15
2	46,2	165	298,15
2	46,3	165	298,15
2	47,9	165	298,15
2	49,2	165	298,15
2	49,3	165	298,15
2	51,1	165	298,15
2	51,4	165	298,15
2	51,9	165	298,15
2	52,2	165	298,15
2	52,9	165	298,15
2	55,0	165	298,15
2	56,9	165	298,15
2	57,5	165	298,15
2	66,8	165	298,15
2	66,8	165	298,15
2	68,4	165	298,15
2	68,9	165	298,15
3	118,2	150	298,15
3	127,2	150	298,15
3	131,4	150	298,15
3	135,2	150	298,15
3	137,0	150	298,15
3	141,8	150	298,15
3	153,6	150	298,15
3	154,4	150	298,15
3	159,7	150	298,15
3	160,4	150	298,15
3	161,5	150	298,15
3	168,3	150	298,15
3	169,1	150	298,15
3	169,5	150	298,15
3	170,6	150	298,15
3	176,7	150	298,15
3	177,8	150	298,15
3	178,2	150	298,15
3	178,5	150	298,15
3	183,3	150	298,15

3	187,6	150	298,15
3	192,4	150	298,15
3	215,9	150	298,15
3	226,5	150	298,15
4	10,5	180	288,15
4	11,7	180	288,15
4	12,1	180	288,15
4	12,3	180	288,15
4	12,7	180	288,15
4	12,8	180	288,15
4	13,7	180	288,15
4	13,9	180	288,15
4	14,4	180	288,15
4	14,5	180	288,15
4	15,5	180	288,15
4	15,7	180	288,15
4	15,8	180	288,15
4	16,1	180	288,15
4	16,3	180	288,15
4	16,3	180	288,15
4	16,6	180	288,15
4	16,9	180	288,15
4	19,2	180	288,15
4	20,3	180	288,15
4	22,0	180	288,15
4	22,5	180	288,15
4	23,1	180	288,15
4	23,2	180	288,15
5	32,8	165	288,15
5	41,0	165	288,15
5	41,1	165	288,15
5	42,9	165	288,15
5	43,4	165	288,15
5	45,1	165	288,15
5	46,3	165	288,15
5	46,5	165	288,15
5	47,2	165	288,15
5	47,4	165	288,15
5	47,9	165	288,15

5	48,0	165	288,15
5	48,9	165	288,15
5	50,0	165	288,15
5	51,4	165	288,15
5	51,9	165	288,15
5	52,8	165	288,15
5	55,9	165	288,15
5	64,2	165	288,15
5	77,4	165	288,15
5	87,6	165	288,15
5	91,8	165	288,15
5	105,6	165	288,15
5	105,7	165	288,15
6	11,5	180	263,15
6	12,4	180	263,15
6	13,9	180	263,15
6	13,9	180	263,15
6	14,1	180	263,15
6	14,5	180	263,15
6	14,9	180	263,15
6	17,5	180	263,15
6	19,1	180	263,15
6	19,2	180	263,15
6	19,4	180	263,15
6	19,9	180	263,15
6	21,0	180	263,15
6	24,5	180	263,15
6	33,3	180	263,15
6	37,9	180	263,15
7	24,3	165	263,15
7	25,5	165	263,15
7	26,4	165	263,15
7	27,9	165	263,15
7	31,1	165	263,15
7	33,1	165	263,15
7	33,3	165	263,15
7	33,3	165	263,15
7	33,9	165	263,15
7	34,1	165	263,15

7	36,3	165	263,15
7	37,3	165	263,15
7	37,6	165	263,15
7	42,4	165	263,15
7	51,2	165	263,15
7	59,0	165	263,15
7	64,7	165	263,15
7	74,4	165	263,15
7	79,5	165	263,15
7	81,2	165	263,15
7	81,5	165	263,15
7	82,5	165	263,15
7	87,0	165	263,15
7	113,8	165	263,15

Fonte: Autoria própria.

A tabela A2 refere-se aos dados do ensaio acelerado de vida do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 127V.

Tabela A2 - Dados QALT do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 127V

ENSAIO	TTF (Horas)	TENSÃO (V)
1	10,6	180
1	11,2	180
1	11,4	180
1	11,4	180
1	11,4	180
1	11,8	180
1	12,3	180
1	12,3	180
1	12,5	180
1	12,6	180
1	12,8	180
1	13,1	180
1	13,4	180
1	13,8	180
1	13,8	180

1	14,3	180
1	15,6	180
1	15,7	180
1	16,1	180
1	16,4	180
1	16,9	180
1	17,8	180
1	20,7	180
1	22,0	180
2	31,3	165
2	31,9	165
2	38,6	165
2	38,9	165
2	39,5	165
2	43,8	165
2	45,1	165
2	46,2	165
2	46,3	165
2	47,9	165
2	49,2	165
2	49,3	165
2	51,1	165
2	51,4	165
2	51,9	165
2	52,2	165
2	52,9	165
2	55,0	165
2	56,9	165
2	57,5	165
2	66,8	165
2	66,8	165
2	68,4	165
2	68,9	165
3	118,2	150
3	127,2	150
3	131,4	150
3	135,2	150
3	137,0	150
3	141,8	150

3	153,6	150
3	154,4	150
3	159,7	150
3	160,4	150
3	161,5	150
3	168,3	150
3	169,1	150
3	169,5	150
3	170,6	150
3	176,7	150
3	177,8	150
3	178,2	150
3	178,5	150
3	183,3	150
3	187,6	150
3	192,4	150
3	215,9	150
3	226,5	150

Fonte: Autoria própria.

A tabela A3 refere-se aos dados do ensaio acelerado de vida do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 220V.

Tabela A3 - Dados QALT do tipo IPL das lâmpadas incandescentes 220V

ENSAIO	TTF (Horas)	CENSURA	TENSÃO (V)
1	31,9	F	300
1	46,9	F	300
1	49,7	F	300
1	53,1	F	300
1	58,4	F	300
1	68,9	F	300
1	69,9	F	300
1	70,1	F	300
1	70,5	F	300
1	74,9	F	300

Tabela A4 - Dados de campo para LDA das lâmpadas LED

PRODUTO	TTF (Horas)	FREQUÊNCIA	CENSURA
A	720	171	F
A	1440	486	F
A	2160	681	F
A	2880	100	F
A	3600	23	F
A	4320	24	F
A	5040	14	F
A	5760	19	F
A	6480	11	F
A	7200	11	F
A	7920	6	F
A	8640	10	F
A	9360	5	F
B	720	13	C
B	1440	24	C
B	2160	26	C
B	2880	1	C
B	6480	1	C
B	7200	1	C
B	7920	1	C
B	8640	1	C
C	720	237	C
C	1440	203	C
C	2160	146	C
C	2880	142	C
C	3600	139	C
C	4320	146	C
C	5040	140	C
C	5760	142	C
C	6480	113	C
C	7200	130	C
C	7920	152	C
C	8640	134	C
C	9360	35	C

D	720	4	F
D	1440	16	F
D	2160	38	F
D	2880	3	F
D	3600	5	F
D	5760	1	F
D	6480	1	F
D	7200	2	F
D	7920	2	F
D	9360	1	F
E	1440	2	C
E	2160	3	C
E	2880	1	C
E	8640	1	C
F	720	63	C
F	1440	46	C
F	2160	29	C
F	2880	28	C
F	3600	29	C
F	4320	26	C
F	5040	40	C
F	5760	40	C
F	6480	40	C
F	7200	30	C
F	7920	41	C
F	8640	30	C
F	9360	17	C
G	720	4	F
G	1440	2	F
G	2160	2	F
G	9360	1	F
H	720	39	C
H	1440	16	C
H	2160	19	C
H	2880	16	C
H	3600	23	C
H	4320	18	C
H	5040	25	C
H	5760	13	C

H	6480	23	C
H	7200	22	C
H	7920	26	C
H	8640	40	C
H	9360	11	C

Fonte: Aatoria própria.