

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

**LONZEN MENDES BARCELOS**

**ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS EM INVERSORES DE FREQUÊNCIAS  
UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**LONZEN MENDES BARCELOS**

**ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS EM INVERSORES DE FREQUÊNCIAS  
UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

**CURITIBA**

**2019**



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**

### **ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS EM INVERSORES DE FREQUÊNCIAS UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.**

por

**LONZEN MENDES BARCELOS**

Esta monografia foi apresentada em 5 de Outubro de 2019, 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. Carlos Henrique Mariano, Dr.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
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.

Dedico este trabalho à minha esposa, meus filhos, pais e irmãos, que sempre me apoiaram e estão ao meu lado, não importa a circunstância.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente terei dificuldades de agradecer, nos parágrafos a seguir, todas as pessoas que de maneira direta ou indireta, contribuíram em minha vida pessoal ou profissional fazendo com que eu alcançasse esse importante marco em minha vida. Portanto, desde já, peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão. Porém, com certeza, não poderei deixar de citar algumas pessoas que para mim, são e foram extremamente importantes até aqui, e tenho certeza de que continuarão sendo por muitos e muitos anos que se seguem.

Agradeço profundamente à minha querida e amada esposa Raquel de Sousa Barcelos, que durante os últimos 21 anos esteve ao meu lado, como namorada e esposa, que juntos construímos a família que tanto amo, que me apoia e ama de forma que me faz um homem completo e feliz.

Aos meus filhos, Matheus de Sousa Barcelos e Lorena de Sousa Barcelos, que são a razão da minha vida, meu combustível e alegria do dia a dia, com certeza, não conseguirei expressar em palavras a magnitude do amor que sinto.

Aos meus pais Edy Barcelos e Antônia Marta Mendes Barcelos, pelo amor, educação e dedicação aos filhos. Amo-os de coração pelos pais que são e estão sempre em minhas orações, sem eles, eu com certeza não chegaria aqui. Temos hoje poucos momentos juntos, devido à distância, mas sei que estão sempre comigo, e são o meu alicerce, assim como uma família deve ser.

Aos meus irmãos, Etienne M. Barcelos, Everton M. Barcelos e Thyasley M. Barcelos, que infelizmente, devido às circunstâncias da vida, passamos pouco tempo juntos. Amo-os como os irmãos que são, e tenho muito orgulho das pessoas que se tornaram, sempre estão em meus pensamentos e orações.

Ao meu grande amigo, “irmão” e compadre, Josenir Wilpert, amizade essa, que quero levar para a minha vida, parceiro para qualquer ocasião, que me ajudou em momentos difíceis da minha vida, mas também proporcionou momentos de inúmeras risadas e alegria, é com certeza, um gigante em matéria de amizade, cumplicidade e lealdade.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa ou na formação do meu caráter pessoal e profissional.

## RESUMO

BARCELOS, Lonzen Mendes. **Ensaio de vida acelerados em inversores de frequências utilizados em sistemas de refrigeração**. 2019, 112 páginas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho apresenta a aplicação de ensaios de vida acelerados em inversores de frequência aplicados a sistemas de refrigeração objetivando-se conduzir uma análise de confiabilidade quantitativa após ensaios de vida acelerados. Através de dados de falhas coletados em cada teste, juntamente com o entendimento dos principais fatores de aceleração do produto é possível analisar a confiabilidade do produto extrapolando tais dados para a aplicação em campo. O método proposto é uma aplicação dos conceitos de ensaios de vida acelerados quantitativos em um processo de desenvolvimento de produto, fazendo-se possível obterem-se as métricas da confiabilidade do produto em questão já no *design*, sendo uma entrega do projeto após sua fase de desenvolvimento.

**Palavras-chave:** Ensaio de vida acelerado. Análise de confiabilidade quantitativa. Dados de falha. Fatores de aceleração. Desenvolvimento de produtos.

## ABSTRACT

BARCELOS, Lonzen Mendes. **Ensaaios de vida acelerados em inversores de frequências utilizados em sistemas de refrigeração**, 2019, 112 páginas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This paper, aims to demonstrate the Accelerated Life Tests applied to electronic frequency inverters used in refrigeration systems with the objective to conduct a quantified reliability analysis after some accelerated life tests. With the test data collected after each test and the knowledge of which are the main acceleration factors for the product, it is possible to analyze the product reliability and extrapolating such data to the conditions in the field. Such proposed method is an application of the Quantified Accelerated Life Tests (QALT) concepts in a product development process, being possible to obtain the reliability metrics of a product under evaluation, already in the design phase, also, being a project standard deliverable after the development phase.

**Key-words:** Accelerated Life Tests. Quantified reliability analysis. Test data. Acceleration factors. Product development.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Sistema de refrigeração .....	23
Figura 2.2 - Esquema de ligação genérico de um motor de indução .....	28
Figura 2.3 - Modo de operação de um compressor de velocidade fixa .....	29
Figura 2.4 - Modo de operação de um compressor de velocidade variável .....	31
Figura 2.5 - Diagrama de bloco do inversor de frequência.....	32
Figura 2.6- Inversor de frequência na caixa .....	33
Figura 2.7 - Inversor de frequência .....	34
Figura 3.1 - Curva da banheira.....	37
Figura 3.2 - Efeito do parâmetro beta na curva pdf de uma distribuição Weibull .....	40
Figura 3.3 - Efeito do parâmetro beta na curva de taxa falha de uma distribuição Weibull .....	41
Figura 3.4 - Efeito do parâmetro gama na curva de confiabilidade de uma distribuição Weibull .....	42
Figura 3.5 - Efeito do parâmetro gama na curva de confiabilidade de uma distribuição Weibull .....	43
Figura 3.6 - Limites dos níveis de estresses de um produto .....	46
Figura 3.7 - Ensaio de vida acelerado .....	50
Figura 3.8 - Parâmetros da distribuição Weibull.....	51
Figura 3.9 - Dados completos até a falha.....	56
Figura 3.10 - Dados censurados à direita .....	57
Figura 3.11 - Dados censurados em intervalos .....	58
Figura 3.12 - Dados censurados à esquerda .....	58
Figura 4.1 - Inversor com a caixa aberta para realização do ensaio .....	61
Figura 4.2 – Fence do compressor.....	61
Figura 4.3 - Conexões do inversor .....	62
Figura 4.4 - Supervisório criado em LabView® para controle do ensaio.....	64
Figura 4.5 - Placa de relés para controle dos inversores .....	64
Figura 4.6 - Esquema de ligação do inversor no ensaio .....	65

Figura 4.7 - Disposição dos inversores em câmara .....	65
Figura 4.8 - Amostras de inversores em teste na câmara climática .....	66
Figura 4.9 - Compressores usados no ensaio.....	67
Figura 4.10 - Equipamentos utilizados para controle e aquisição dos dados do teste. .....	68
Figura 4.11 - Layout da estrutura de teste .....	68
Figura 4.12 - Supervisório criado em LabView para controle do ensaio .....	69
Figura 4.13 - Tabela de aquisição das temperaturas .....	70
Figura 4.14 - Indicador do grupo que está ligado e número de ciclos até o momento .....	70
Figura 4.15 - Painel para mostrar o tempo de teste e a expectativa de vida do produto até o momento (Ver cálculo do fator de aceleração).....	71
Figura 4.16 - Indicação de quais os compressores que estão ligados .....	71
Figura 4.17 - Seleciona o diretório para salvar os dados .....	72
Figura 4.18 - Temperaturas ambiente no setup de teste.....	73
Figura 4.19 - Ciclo térmico da temperatura e umidade do teste.....	78
Figura 4.20 - Ciclo de funcionamento dos 4 grupos .....	79
Figura 4.21- Condensação criada na PCB da placa 59 .....	97
Figura 4.22 - Condensação criada na PCB da placa 59 .....	98
Figura 4.23 - Medição do sinal do PWM do Driver .....	99
Figura 4.24 - Gráfico de probabilidade Weibull .....	101
Figura 4.25 - Gráfico de confiabilidade versus tempo .....	102
Figura 4.26 - Confiabilidade do produto para 10 anos .....	103
Figura 4.27 - Gráfico da pdf.....	104
Figura 4.28 - Taxa de falha .....	105
Figura 4.29 - Linha do tempo com as falhas e suspensões .....	106
Figura 4.30 - Probabilidade de falha para 10 anos de vida.....	107
Figura 4.31 - MTTF .....	107

## LISTA DE ACRÔNIMOS

AF	Fator de aceleração do teste
AFU	Fator de aceleração da umidade
AFT	Fator de aceleração total da temperatura
AFTU	Fator de aceleração total da umidade
ALT	<i>Accelerated Life Test</i> (Teste de vida acelerado)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DFSS	<i>Design For Six Sigma</i>
DMAIC	<i>Design, Measure, Analyze, Improve, Control</i>
DOE	<i>Design of Experiment</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FMECA	<i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis</i>
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>
HALT	<i>Highly Accelerated Life Test</i>
HASA	<i>Highly Accelerated Stress Audit</i>
HASS	<i>Highly Accelerated Stress Screening</i>
HAST	<i>Highly Accelerated Stress Test</i>
HTOL	<i>High Temperature Operation Life</i>
LDA	<i>Life Data Analysis</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
OLP	<i>Overload Protector</i>
PDCA	<i>Plan, Do, Control, Analyze</i>
pdf	<i>Probability Density Function</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coeficient</i>
QALT	<i>Quantitative Accelerated Life Test</i>

RPM      Rotação Por Minuto

VCC      *Variable Capacity Compressor*

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivo Específico.....	19
1.3	JUSTIFICATIVA .....	19
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2.</b>	<b>OBJETO DO ESTUDO (INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO).....</b>	<b>22</b>
2.1	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO .....	22
2.1.1	Evaporador.....	24
2.1.2	Condensador.....	24
2.1.3	Fluido refrigerante .....	25
2.1.4	Compressor.....	25
2.1.4.1	Tipos de Compressores para Sistemas de Refrigeração .....	26
2.1.4.1.1	Alternativo: .....	26
2.1.4.1.2	Rotativo .....	26
2.1.4.1.3	Centrífugo.....	26
2.1.4.1.4	Parafuso .....	26
2.1.4.1.5	Scroll .....	27
2.1.5	Tecnologias de Acionamento e Controle de Compressores.....	27
2.1.5.1	Compressores de velocidade (capacidade) fixa .....	27
2.1.5.1.1	Modo de operação.....	28
2.1.5.2	Compressores de velocidade variável.....	29
2.1.5.2.1	Modo de operação.....	30
2.2	INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	31
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	34
<b>3.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>36</b>
3.1	MODELOS DE CONFIABILIDADE.....	36
3.1.1	Distribuição Weibull .....	38
3.1.1.1	Parâmetro $\beta$ .....	39
3.1.1.2	Parâmetro $\gamma$ .....	41
3.1.1.3	Parâmetro $\eta$ .....	42
3.1.1.4	Métricas da confiabilidade. ....	43
3.2	ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS .....	45
3.2.1	Modelos de ensaios de vida acelerados.....	45
3.2.2	Ensaio de vida acelerado qualitativo .....	45
3.2.3	Ensaio de vida acelerado quantitativo .....	46
3.3	VARIÁVEIS DE ESTRESSES .....	47
3.3.1	Temperatura.....	48
3.3.1.1	Energia de ativação.....	49
3.3.1.1.1	Obtenção da energia de ativação.....	49
3.3.2	Modelo Eyring e modelo Peck's modelo de temperatura-umidade .....	53
3.3.3	Umidade .....	53
3.4	TIPOS DE DADOS .....	54

3.4.1	Dados Completos.....	55
3.4.2	Dados Censurados.....	56
3.4.2.1	Dados censurados à direita.....	56
3.4.2.2	Dados censurados em intervalos.....	57
3.4.2.3	Dados censurados à esquerda.....	58
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	59
<b>4.</b>	<b>APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>60</b>
4.1	DESCRIÇÃO E PROCEDIMENTO DO ENSAIO.....	60
4.1.1	Descrição e funcionamento do software.....	69
4.1.2	Testes de validação do software e estrutura.....	72
4.1.2.1	Calibração dos termopares.....	72
4.1.2.2	Proteção por Hardware.....	73
4.1.2.2.2	Falta de energia elétrica durante o teste.....	74
4.1.2.2.3	Proteção de inversor/compressor ligado acima de 15 min.....	74
4.1.2.2.4	Proteção de inversor/compressor ligado fora de seu ciclo.....	75
4.1.2.2.5	Proteção de grupo ligado fora do ciclo.....	76
4.1.2.2.6	Proteção por sobre temperatura na câmara.....	77
4.1.2.3	Resultado geral dos testes de proteção da estrutura.....	77
4.2	SETUP DO TESTE.....	78
4.3	CÁLCULO DO FATOR DE ACELERAÇÃO DO ENSAIO.....	80
4.3.1	Fator de aceleração da temperatura.....	80
4.3.1.1	Fator de aceleração para $T_{1uso}$ e 85 °C de câmara:.....	82
4.3.1.2	Fator de aceleração para $T_{2uso}$ e 85 °C de câmara:.....	82
4.3.1.3	Fator de aceleração para $T_{3uso}$ e 85 °C de câmara:.....	83
4.3.1.4	Fator de aceleração para $T_{4uso}$ e 85 °C de câmara:.....	83
4.3.1.5	Fator de aceleração para $T_{5uso}$ e 85 °C de câmara:.....	83
4.3.1.6	Fator de aceleração para $T_{6uso}$ e 85 °C de câmara:.....	83
4.3.1.7	Fator de aceleração para $T_{7uso}$ e 85 °C de câmara:.....	84
4.3.1.8	Fator de aceleração para $T_{8uso}$ e 85 °C de câmara:.....	84
4.3.1.9	Fator de aceleração para $T_{9uso}$ e 85 °C de câmara:.....	84
4.3.1.10	Fator de aceleração para $T_{10uso}$ e 85 °C de câmara:.....	84
4.3.1.11	Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 85 °C.....	85
4.3.1.12	Fator de aceleração para $T_{1uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	86
4.3.1.13	Fator de aceleração para $T_{2uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	86
4.3.1.14	Fator de aceleração para $T_{3uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	86
4.3.1.15	Fator de aceleração para $T_{4uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	87
4.3.1.16	Fator de aceleração para $T_{5uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	87
4.3.1.17	Fator de aceleração para $T_{6uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	87
4.3.1.18	Fator de aceleração para $T_{7uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	87
4.3.1.19	Fator de aceleração para $T_{8uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	87
4.3.1.20	Fator de aceleração para $T_{9uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	88
4.3.1.21	Fator de aceleração para $T_{10uso}$ e 57,5 °C de câmara:.....	88
4.3.1.22	Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 57,5 °C.....	88
4.3.1.23	Fator de aceleração para $T_{1uso}$ e 30 °C de câmara:.....	89
4.3.1.24	Fator de aceleração para $T_{2uso}$ e 30 °C de câmara:.....	89
4.3.1.25	Fator de aceleração para $T_{3uso}$ e 30 °C de câmara:.....	90
4.3.1.26	Fator de aceleração para $T_{4uso}$ e 30 °C de câmara:.....	90
4.3.1.27	Fator de aceleração para $T_{5uso}$ e 30 °C de câmara:.....	90
4.3.1.28	Fator de aceleração para $T_{6uso}$ e 30 °C de câmara:.....	90
4.3.1.29	Fator de aceleração para $T_{7uso}$ e 30 °C de câmara:.....	90

4.3.1.30	Fator de aceleração para $T_{8\text{uso}}$ e 30 °C de câmara: .....	91
4.3.1.31	Fator de aceleração para $T_{9\text{uso}}$ e 30 °C de câmara: .....	91
4.3.1.32	Fator de aceleração para $T_{10\text{uso}}$ e 30 °C de câmara: .....	91
4.3.1.33	Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 30 °C .....	91
4.3.1.34	Fator de aceleração total da temperatura.....	92
4.3.2	Fator de aceleração da umidade .....	92
4.3.2.1	Fator de aceleração para $RH_u$ (40%) e $RH_{t1}$ .....	93
4.3.2.2	Fator de aceleração para $RH_u$ (40%) e $RH_{t2}$ (62%).....	94
4.3.2.3	Fator de aceleração para $RH_u$ (40%) e $RH_{t3}$ (40%).....	94
4.3.2.4	Fator de aceleração total da umidade .....	95
4.3.3	Fator de aceleração total do ensaio .....	95
4.4	RESULTADOS DO ENSAIO .....	96
4.5	ANÁLISES DE CONFIABILIDADE .....	100
4.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	108
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>109</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	110
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>111</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As empresas, para que se mantenham atualmente em um negócio com custos e produtos competitivos, são obrigadas a estarem em constantes mudanças através de pesquisas e melhorias de processos de desenvolvimento de produtos que requerem o menor tempo possível e custos baixos com produtos de qualidade.

Uma empresa que investe em desenvolvimento de produtos torna-se uma grande candidata ao sucesso perante o mercado, pois apresenta constante inovação de seus produtos e processos, geralmente melhorando-os em termos de qualidade, segurança, confiabilidade e claro, custos.

Um dos processos de maior importância em pesquisa e desenvolvimento de produtos e que é um dos pilares de garantia de sucesso do negócio é a confiabilidade dos produtos aplicados no campo, pois sabe-se que clientes sempre esperam que todos os produtos comprados, funcionem no primeiro momento e a todo o momento.

Investindo-se em um processo robusto de confiabilidade de produto, é possível se ter, por exemplo, previsibilidades da quantidade de produtos que irão falhar ao longo do tempo, da garantia e riscos que a empresa pode assumir na venda do produto, bem como deixar alinhada a expectativa do cliente. Tais métricas de confiabilidade são de grande importância em uma empresa que está inserida em um mercado de tecnologia e grande competitividade.

Os ensaios de vida acelerados são uma excelente ferramenta para que dentro do processo de desenvolvimento de produtos, tenha-se o conhecimento dessas métricas e em um curto período de tempo, pois submetendo o produto ou componente a cargas de stress acima do stress normal de uso, em um curto período de tempo até a falha, é possível todas as informações necessárias de confiabilidade e usá-las como base para importantes decisões de negócio.

Conhecendo-se a importância de se obter as métricas da confiabilidade já no desenvolvimento de novos produtos, o tema abordado aqui é a realização de ensaios de vida acelerados em inversores de frequência aplicados em sistemas de refrigeração usando análise quantitativa de dados de ensaios de vida acelerados. Os dados também são usados com o intuito de se conhecer a relação vida vs stress do

produto, sendo possível o extrapolarmento das condições de teste para as condições de campo, apenas conhecendo as condições de aplicação final.

O estudo limita-se a utilizar um modelo de ensaio de vida acelerado para produtos eletrônicos, usando como fatores de aceleração temperatura e umidade. Fatores esses que são reconhecidos como os principais causadores de falhas em produtos eletrônicos no campo.

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMAS DE PESQUISA

Em um cenário de concorrência global, as empresas sofrem fortes pressões para desenvolverem produtos com alta tecnologia em tempos recordes com custos baixos enquanto melhoram seus processos como produtividade, qualidade, segurança e confiabilidade. Esse cenário, há décadas vem motivando o desenvolvimento de métodos como experimentos científicos em fases preliminares de design, melhorias em processos e produtos focadas na qualidade e confiabilidade.

Requisitos cada vez mais restritos de incremento de confiabilidade de produtos e serviço mostram a necessidade de métodos de ensaios bem delineados aplicados a componentes, materiais ou sistemas. Tais requisitos estão alinhados com as filosofias de qualidade de produtos das empresas, onde a que apresenta melhor qualidade com o menor custo, vence.

Com essas necessidades cada vez mais fortes, ferramentas e métodos de ensaios de produtos foram desenvolvidos ao longo de décadas, visando sempre, a obtenção de respostas cada vez mais próximo da fase de desenvolvimento do produto/serviço. Ferramentas de qualidade (DFSS, DMAIC, PDCA, FMEA, FMECA, FTA, etc.), análises estatísticas, ensaios e suas análises de falhas são alguns dos vários métodos utilizados no desenvolvimento de produtos que proporcionam respostas rápidas e precisas quanto à qualidade ou confiabilidade do item.

Os ensaios de vida acelerados são ferramentas de extrema importância no desenvolvimento de produtos, sua metodologia, consiste em submeter o produto a elevados níveis de estressamentos com o intuito de revelar fraquezas do mesmo em um curto período de tempo. Essa metodologia tornou-se muito usada por empresas

de desenvolvimento de produtos e estudos cada vez mais aprimorados são desenvolvidos. Uma evolução do ALT é o QALT, método esse que além de revelar os pontos fracos dos produtos, revela dados quantitativos, onde análises estatísticas são possíveis de serem conduzidas com os dados de falha ao longo do tempo e isso se torna importante quando se quer conhecer o comportamento da falha, o tempo até a falha, taxa de falha e confiabilidade do produto ao longo dos anos.

Outros métodos de ensaios usados em estudos de confiabilidade de produtos com respostas rápidas também são aplicados, tais como: HALT, HAST, HASS, HASA, porém esses, não fornecem dados de métricas de confiabilidade, apenas de qualidade e robustez.

Então, quais ferramentas/métodos seriam as ideais a serem aplicadas para análise de confiabilidade de produtos durante o desenvolvimento?

Dependendo da fase do desenvolvimento e das respostas que o engenheiro de confiabilidade procura, diferentes métodos podem ser usados.

Aqui, abordaremos um cenário onde o produto já se encontra no final de sua fase de desenvolvimento e deseja-se conhecer qual será a sua confiabilidade em campo para um tempo de 10 anos de vida. O método mais adequado para isso é a utilização da metodologia QALT, com o uso de ferramenta de análise Weibull ++<sup>®</sup>, auxiliando, por exemplo, a obtenção dos resultados de análises de dados de vida, confiabilidade do produto, tempo médio de vida entre outras métricas da confiabilidade.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, geral e específicos, são apresentados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Apresentar um estudo de confiabilidade em inversores de frequências utilizados em sistemas de refrigeração através de ensaios de vida acelerados.

### 1.2.2 Objetivo Específico

- Estudar, aplicar e determinar as métricas de confiabilidade de inversores de frequências utilizados em sistemas de refrigeração através de métodos de ensaio de vida acelerado.
- Com dados de falhas do ensaio, apresentar um método de análise de confiabilidade, extrapolando os resultados para a realidade da aplicação em campo.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Em uma empresa de tecnologia, a fase de desenvolvimento de produtos representa uma parcela importante nos custos do produto final, pois elevados recursos financeiros são geralmente despendidos nessa fase, profissionais capacitados e caros são necessários, equipamentos utilizados em estruturas de ensaios, tempo de lançamento dos produtos etc.

Nesse cenário, a competitividade em custos, qualidade, confiabilidade e segurança dos produtos são os principais pilares de sustentação de um negócio, e isso faz com que a fase de desenvolvimento de produto tenha uma grande importância para a empresa, pois é nela que tais pilares são construídos.

As consequências de um desenvolvimento de produto não estruturado podem ser gigantescas para uma empresa quando problemas em um desses pilares são encontrados já com o produto lançado no mercado e a frustração aumenta principalmente quando o problema poderia ter sido mitigado ou eliminado no momento certo, antes do lançamento.

Um dos importantes pilares aqui mencionado, confiabilidade, requer uma parcela significativa dos recursos de uma empresa. Geralmente, os custos envolvidos com ensaios, profissionais capacitados, tempo das análises e ferramentas necessárias são os mais relevantes, e somente essas características, já justificam os estudos e discussões sobre algumas abordagens e conceitos que

podem ser utilizados em ensaios e análises de confiabilidade de produtos, visando obter os melhores resultados possíveis, com os menores custos envolvidos.

Conceitos de ensaios de vida acelerados e análises de dados podem ser usados como um programa de avaliações contínuas de produtos em sua fase de desenvolvimento, obtendo resultados estatísticos capazes de suportarem decisões técnicas e gerenciais importantes, no menor tempo e custos possíveis. Sendo assim um tema de grande importância, julga-se necessário os estudos aqui apresentados.

#### 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos deste trabalho, de forma macro, são apresentados na seguinte estruturação:

Pesquisa de referências bibliográficas, como estudos disponibilizados na internet, biblioteca da Universidade, trabalhos similares ou normas aplicáveis.

Consultas a profissionais e especialistas de Confiabilidade na Universidade e na Indústria.

Estudo aprofundado do Software a ser utilizado nas análises de Confiabilidade.

Com a parte teórica bem definida, tem-se a aplicação da teoria aos ensaios, seguindo a seguinte estruturação:

Planejamento do ensaio a ser realizado. Itens como: especificação do produto a ser submetida ao ensaio, especificação dos equipamentos a serem utilizados, preparação do produto em teste, métodos de estressamento do produto e coleta de dados são abordados nessa fase.

Tratamento dos dados após término dos ensaios, análise dos mesmos e resultados obtidos. Análises conclusivas de confiabilidade e extrapolações para a vida do produto em campo fazem parte da conclusão do trabalho, dando ao mesmo, os resultados das análises realizadas e definindo as métricas da confiabilidade do produto em análise.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente capítulo é o introdutório ao tema, trazendo consigo algumas premissas da pesquisa, seus objetivos gerais e específicos, juntamente com a justificativa do porquê este trabalho tem importância.

Os demais capítulos possuem o seguinte conteúdo:

- O Capítulo 2 apresenta o objeto do estudo, aqui referenciado como inversores de frequência usados em sistemas de refrigeração, sua tecnologia, aplicação específica e principais características.
- O Capítulo 3 apresenta o referencial teórico sobre Engenharia da Confiabilidade, Ensaio de Vida Acelerados e Análise de Dados de Vida, teorias que são aplicáveis aos assuntos abordados neste trabalho e que são usadas como base da pesquisa.
- O Capítulo 4 apresenta em mais detalhes como a teoria apresentada no Capítulo 3 (referencial teórico) é usada na aplicação prática na análise do produto apresentado no Capítulo 2. Também apresenta os resultados obtidos com o ensaio de vida acelerado nos inversores de frequência, análises de confiabilidade durante o desenvolvimento do
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho bem como propostas para trabalhos futuros.

## **2. OBJETO DO ESTUDO (INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO).**

Anteriormente a explicação sobre inversores de frequência, para que o leitor tenha um entendimento claro e amplo da aplicação do mesmo em sistemas de refrigeração, é importante se ter conhecimento sobre como funciona um sistema de refrigeração, seus principais componentes e circuitos. Também, como os inversores de frequências usados aqui como objeto de estudo são aplicados ao controle de um importante produto dentro do sistema, o compressor, será também feita uma breve explicação sobre o que é o compressor, suas principais tecnologias e aplicação.

Com esse entendimento, ficará mais simples e fácil a compreensão sobre a tecnologia de inversores de frequência, suas aplicações e vantagens.

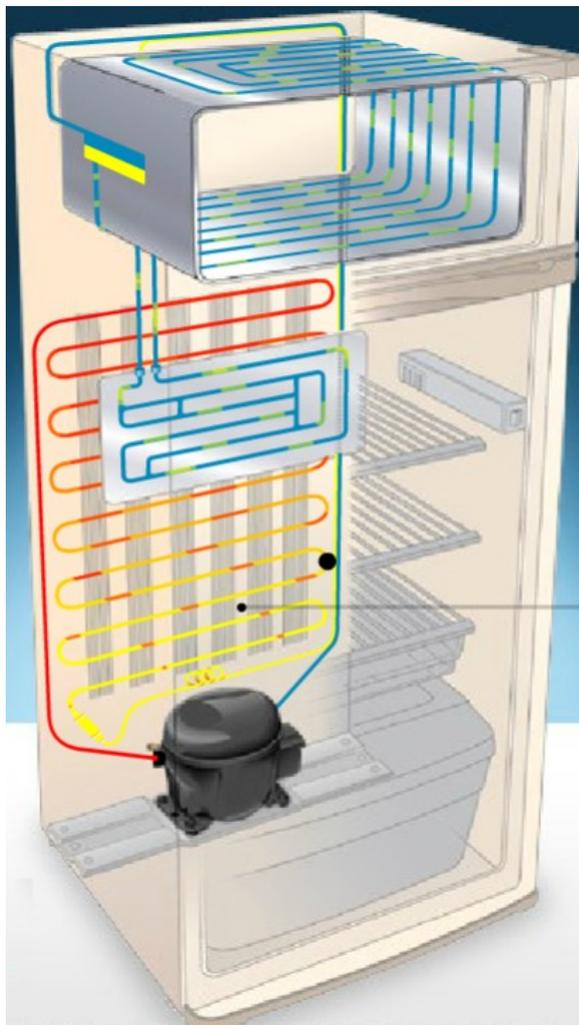
### **2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

Pode-se definir um sistema de refrigeração como um conjunto de componentes que são combinados entre si para que seja possível fazer a transferência de calor de um lugar para outro. Basicamente, o que um sistema de refrigeração faz, é fazer a transferência do calor, que está no ambiente que se deseja refrigerar, para fora desse ambiente. Um sistema de refrigeração é basicamente constituído pelos seguintes principais componentes:

- Evaporador
- Condensador
- Fluido refrigerante
- Compressor

A Figura 2.1 representa um sistema de refrigeração clássico, com seus principais componentes.

Figura 2.1 - Sistema de refrigeração



Fonte: Eletro peças real (2017).

É possível verificar que o fluido refrigerante é bombeado pelo compressor para o condensador em seu estado gasoso, causando baixa pressão no evaporador e alta pressão no condensador. O fluido circula nesse sistema fechado ininterruptamente durante o funcionamento do compressor, sempre saindo de seu estado gasoso (quando retorna do evaporador), para o estado líquido (quando passa pelo condensador) e repetindo esse ciclo durante o funcionamento do sistema.

O funcionamento pode ser explicado na seguinte sequência:

1. O compressor comprime o fluido aquecido vindo do evaporador e elevando sua pressão e temperatura.

2. O fluido, em seu estado gasoso, é bombeado para o condensador que libera o calor do fluido para o ambiente externo. Aqui o fluido é condensado pela transferência de calor, vindo a ficar no estado líquido.

3. Após a passagem pelo condensador, o fluido passa pelo filtro secador, onde é filtrado com material dessecante tendo a finalidade de reter impurezas e/ou umidade que porventura haja no sistema.

4. Na sequência, o fluido entra no tubo capilar que cria uma resistência à circulação do fluido refrigerante, causando uma grande diferença de pressão entre o condensador e evaporador. Assim, o fluido entra no tubo capilar ainda em seu estado líquido em direção ao evaporador onde encontra a baixa pressão.

5. No evaporador, o fluido passa do estado líquido para o gasoso, onde o mesmo em sua passagem retira o calor do ambiente interno do refrigerador.

Com o entendimento geral do funcionamento do sistema de refrigeração, é importante se ter uma breve descrição de seus componentes e o objetivo de cada um, conforme explicado a seguir.

### 2.1.1 Evaporador

Como o próprio nome diz, o evaporador tem a função de evaporar o fluido refrigerante. O fluido, ao encontrar um sistema de baixa pressão, passa do estado líquido para o gasoso removendo durante essa passagem, o calor do ambiente que se quer refrigerar, ou seja, o evaporador, em outras palavras, transfere o calor do ambiente para o fluido refrigerante, que carrega esse calor para fora do ambiente.

Esse componente é basicamente uma serpentina, geralmente fabricada de cobre ou alumínio.

### 2.1.2 Condensador

Assim como o evaporador, o nome do condensador é dado porque ele condensa o fluido refrigerante. O principal objetivo é dissipar o calor absorvido pelo

fluido quando esse, passou pelo evaporador levando o calor do ambiente interno. É aqui que o gás, quando perde o calor para o ambiente externo, passa de seu estado gasoso para o líquido sendo resfriado para poder retornar ao evaporador e novamente, remover o calor do ambiente interno.

### 2.1.3 Fluido refrigerante

O fluido refrigerante, ou gás refrigerante nada mais é do que um produto químico usado em sistemas de refrigeração para que seja possível ser feito o ciclo térmico explicado acima. O fluido refrigerante é o responsável por retirar o calor do ambiente interno do sistema de refrigeração e dissipá-lo no ambiente externo.

Existem vários tipos de fluidos ou gases refrigerantes usados em sistemas de refrigeração e sua escolha depende de alguns fatores como: capacidade do sistema, eficiência ou até mesmo de regulamentações de cada país.

### 2.1.4 Compressor

Seria praticamente impossível falar sobre sistemas refrigeração, seja ela em aplicações comerciais ou residenciais, sem que o compressor fosse citado. O compressor é o “coração” dos sistemas de refrigeração e sua principal função é bombear o fluido refrigerante que circula no estado líquido ou gasoso. Como o próprio nome sugere, o compressor comprime o fluido refrigerante dentro do sistema, forçando assim o fluxo desse fluido dentro do circuito fazendo com que o ciclo térmico (troca térmica) entre o ambiente interno e o externo seja realizado.

Os compressores são basicamente motores elétricos dotados de alguns componentes que são usados para compressão do fluido. O motor elétrico, quando acionado, faz com que um sistema de compressão seja movimentado, geralmente através de um pistão, fazendo assim que o gás refrigerante seja impulsionado através do sistema de refrigeração.

#### 2.1.4.1 Tipos de Compressores para Sistemas de Refrigeração

Alguns tipos de compressores são explicados abaixo.

##### 2.1.4.1.1 Alternativo:

O tipo mais comum utilizado. A compressão do gás é feita por meio de um pistão dentro de um cilindro. Esse tipo de compressor é mais ruidoso e consome mais energia, por isso vem sendo substituído pelo compressor do tipo rotativo.

##### 2.1.4.1.2 Rotativo

Possui um rotor excêntrico que gira dentro de um cilindro. Com um número menor de peças, porém suas tolerâncias de usinagens mais rigorosas. Suas vantagens em relação aos compressores rotativos são: Mais compactos, mais leves, melhor eficiências e níveis de ruídos mais baixos.

##### 2.1.4.1.3 Centrífugo

Usado geralmente em aparelhos de ar condicionado, conta com um propulsor de alta velocidade e com muitas pás usadas para bombear o fluido refrigerante.

##### 2.1.4.1.4 Parafuso

O compressor do tipo parafuso, possui dois rotores em forma de parafuso que são interligados e rodam em sentido contrário um ao outro. Esse tipo de

compressor é bastante utilizado em refrigeração comercial, onde a capacidade dos sistemas de refrigeração é grande.

#### 2.1.4.1.5 Scroll

Esse tipo de compressor possui duas partes separadas em formato de espiral sendo uma delas fixa e a outra girando inversamente. Esse tipo de compressor também é muito usado em sistemas de ar condicionado.

#### 2.1.5 Tecnologias de Acionamento e Controle de Compressores

Atualmente, existem dois principais tipos de tecnologias largamente utilizadas no controle ou acionamento de compressores.

1. Compressores de velocidade fixa (convencional);
2. Compressores de velocidade (capacidade) variável.

##### 2.1.5.1 Compressores de velocidade (capacidade) fixa.

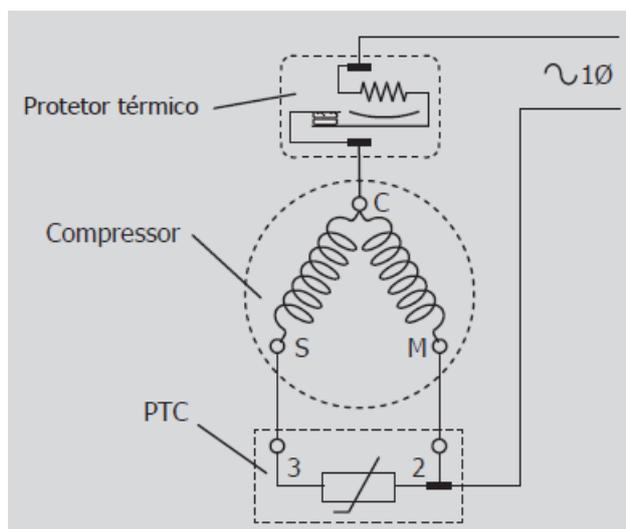
Os compressores de velocidade fixa constituem basicamente motores de indução síncronos (monofásicos, bifásicos ou trifásicos), significando que sua velocidade de rotação é proporcional à frequência de alimentação. Seus dispositivos de partidas, geralmente são relés de partida, ou PTC's (Coeficiente de Temperatura Positiva) onde ambos os dispositivos, trabalham como interruptores do motor, ligando sua bobina auxiliar pelo tempo necessário até que o rotor saia de sua inércia e o motor entre em operação normal.

O elemento de proteção desses compressores é o protetor térmico (OLP). Esse dispositivo é ligado em série com as bobinas do motor do compressor e funciona como uma chave, que abre o circuito quando uma alta temperatura é detectada no compressor. A Figura 2.2 representa o esquema genérico de ligação

de um motor elétrico monofásico de um compressor com velocidade fixa, como é possível verificar, o PTC é responsável por ligar a bobina auxiliar do motor durante a partida, após um tempo pré estabelecido, o PTC (que tem como característica a elevação da sua resistência após a passagem de corrente elétrica), abre o circuito da bobina auxiliar do motor (devido a sua alta resistência), fazendo com que somente a corrente elétrica passe somente pela bobina principal.

O OLP, conforme pode ser observado, é ligado em série com o motor e em caso de uma elevada temperatura nas bobinas do compressor, o mesmo abre o circuito do motor, protegendo o compressor.

Figura 2.2 - Esquema de ligação genérico de um motor de indução

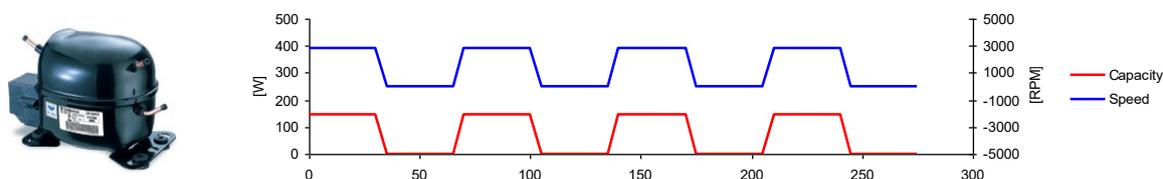


Fonte: Linha de produtos para refrigeração comercial – Catálogo Embraco (2016).

#### 2.1.5.1.1 Modo de operação

A principal característica dos compressores de velocidade fixa é que eles controlam a temperatura do ambiente sob refrigeração fazendo ciclos de liga-desliga durante sua operação. A Figura 2.3 mostra claramente como um compressor de capacidade liga e desliga ao longo de sua operação para controlar a temperatura do ambiente a ser refrigerado.

Figura 2.3 - Modo de operação de um compressor de velocidade fixa



Fonte: Ronaldo R. Duarte (2008).

Essa tecnologia permite que o controle de temperatura apenas ligue ou desligue o compressor na medida da necessidade.

Em um sistema de refrigeração, a temperatura do ambiente que está sob o controle de refrigeração é constantemente medida, essas medições são então comparadas com o set point informado pelo usuário no termostato do refrigerador, então, dependendo da temperatura ambiente, o compressor é ligado ou desligado. Por exemplo, caso a temperatura do ambiente a ser refrigerado seja ajustada para um set point de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o termostato do refrigerador liga o compressor, fazendo com que o fluido refrigerante inicie seu ciclo de refrigeração do ambiente. No momento em que a temperatura do ambiente refrigerado alcança a temperatura pré-determinada, o compressor é desligado. Esse ciclo é constantemente realizado tantas vezes quanto forem necessárias afim de tentar manter-se a temperatura ambiente sob controle e dentro dos limites estabelecidos.

A principal desvantagem desse tipo de compressor é que a cada partida, a corrente é elevada, pois precisa vencer a inércia do rotor e esse pico de corrente é uma perda de energia, o que é refletida na conta de energia. Outra desvantagem é que o controle de temperatura não é tão preciso, ou seja, ligando e desligando o compressor tem-se uma variação térmica maior no ambiente, prejudicando assim a conservação dos alimentos.

#### 2.1.5.2 Compressores de velocidade variável

Os compressores de velocidade variável são motores trifásicos, com motores assíncronos que são controlados por inversores de frequência.

#### 2.1.5.2.1 Modo de operação

Com o compressor de velocidade variável, consegue-se um método de controle da velocidade de operação usando inversores de frequência.

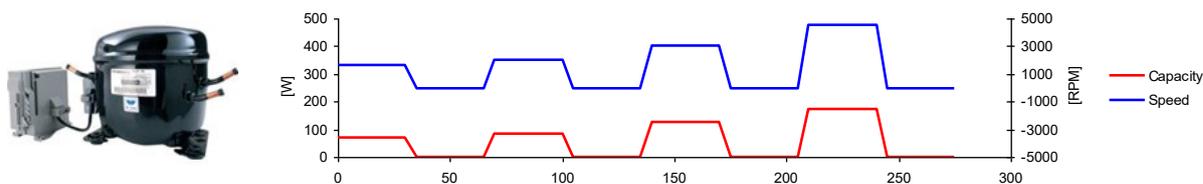
Essa tecnologia, permite o controle da temperatura do ambiente sob refrigeração apenas ajustando a velocidade do compressor na necessidade da demanda.

Quando a temperatura de set point do termostato é ajustada, o compressor entra em operação com a sua capacidade máxima (máxima velocidade), essa velocidade é mantida pelo inversor de frequência (que recebe constantemente o sinal do termostato), até que a temperatura do ambiente refrigerado alcance a temperatura de set point. Nesse momento, o compressor de velocidade variável é desligado. Quando a temperatura do ambiente refrigerado ultrapassa os limites pré-definidos, o termostato envia o sinal para o controle (inversor de frequência), que liga o compressor novamente, porém, aqui percebe-se a grande diferença entre esses dois modelos, enquanto o compressor de velocidade fixa liga em sua capacidade máxima novamente, o compressor de velocidade variável liga em uma velocidade intermediária. Isso porque como a temperatura ambiente agora está próxima do set point, não é necessário consumir a máxima potência do sistema para que a temperatura volte ao seu set point, mas uma velocidade intermediária pode fazer o mesmo trabalho, com um controle mais preciso e menor consumo de energia.

Com isso, um compressor de capacidade variável muitas vezes fica um maior tempo ligado, mas como geralmente no modo ligado seu consumo é baixo, em geral, ele consome até 40% menos energia quando comparado ao compressor convencional.

A Figura 2.4 mostra como um compressor de capacidade variável controla a temperatura do ambiente, variando sua velocidade/capacidade de operação. É possível perceber que o compressor, fica variando a rotação ao longo do funcionamento e isso depende da temperatura ambiente do refrigerador.

Figura 2.4 - Modo de operação de um compressor de velocidade variável



Fonte: Ronaldo R. Duarte (2008).

O resultado é um menor consumo de energia, em função do ajuste da necessidade de refrigeração à potência do motor.

Algumas outras vantagens como: Operação mais robusta, pois não é tão sensível à variação de tensão de alimentação, melhor qualidade na conservação dos alimentos, pois a temperatura ambiente apresenta menores variações, eliminação dos picos de correntes na partida.

## 2.2 INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZADOS EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Com uma visão geral sobre como funciona um sistema de refrigeração, seus principais componentes e circuitos e algumas tecnologias envolvidas, agora é possível, com uma melhor clareza da aplicação, explicar melhor o objeto do estudo desse trabalho que é o inversor de frequência.

Uma rápida introdução à tecnologia de inversores de frequência se faz necessária para que se entenda melhor, o porquê esses dispositivos são usados como elementos de controle de motores elétricos, e como os mesmos são aplicados a sistemas de refrigeração.

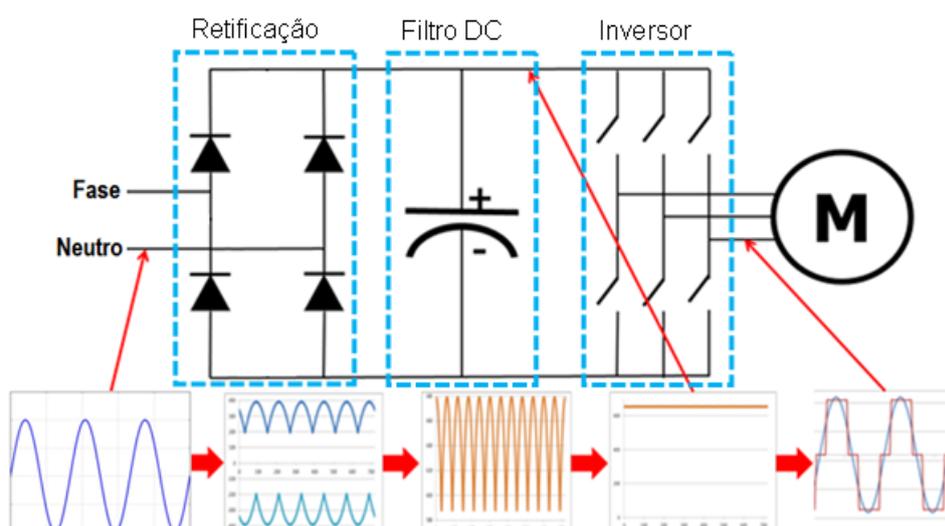
Basicamente, os inversores de frequência são utilizados em compressores de capacidade variável pois possibilitam o ajuste da capacidade de refrigeração do sistema ajustando a velocidade do motor. Devido a várias vantagens técnicas também abordadas na explicação dessa tecnologia de compressores, essa técnica de controle é cada vez mais utilizada, principalmente em países com controles mais rígidos de consumo de energia.

Em uma explicação mais genérica, o inversor de frequência é o dispositivo capaz de variar a rotação de um motor trifásico pelo meio da transformação de corrente alternada com frequência fixa (50 Hz ou 60 Hz por exemplo) em corrente alternada com frequência variável.

A Figura 2.5 apresenta esquema simplificado de um inversor de frequência genérico. É possível verificar que existem basicamente três estágios:

- Estágio de retificação
- Estágio do filtro DC
- Estágio de inversão (inversor)

Figura 2.5 - Diagrama de bloco do inversor de frequência



Fonte: Adaptado de VFDS (2014).

No estágio de retificação, a corrente alternada é retificada em corrente contínua pulsada, conforme mostra a forma de onda da corrente após esse estágio.

No estágio do filtro DC, através de capacitores, é possível transformar a corrente DC pulsada em corrente DC pura.

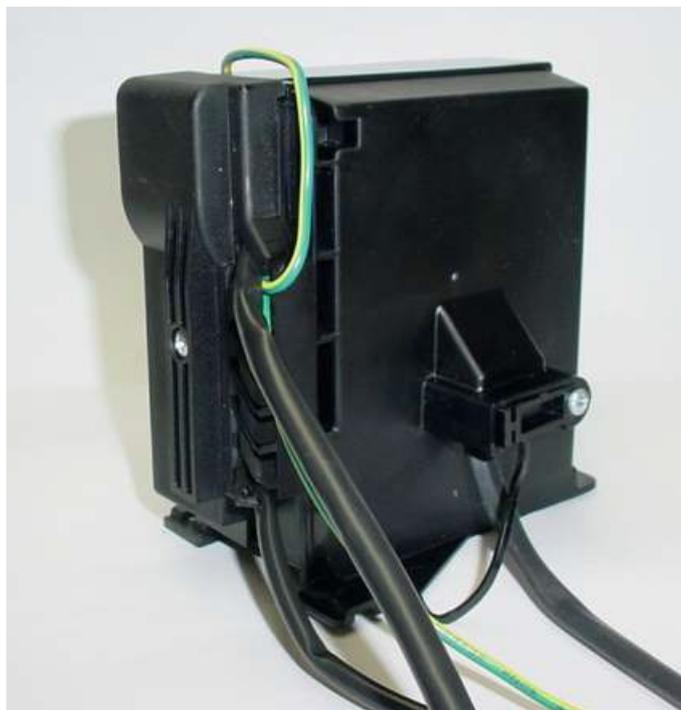
Já no estágio do inversor, a ponte inversora criada com chaves (IGBT's ou MOSFETS, por exemplo), transforma a corrente DC pura novamente em corrente contínua, agora trifásica, porém, dependendo do controle do chaveamento criado, é possível regular a frequência da corrente que controla o motor. Essa variação da

frequência de saída possibilita o controle de rotação do motor, fazendo assim o controle de capacidade do compressor.

O controle do circuito de potência (Ponte retificadora, Filtro DC e Ponte inversora), é geralmente feito por um microprocessador e seus circuitos periféricos.

O modelo genérico exemplifica bem os inversores de frequência utilizados em sistemas de refrigeração, claro, existem outros circuitos utilizados para melhor robustez e atendimento a regulamentações como filtros de EMI ou circuitos de interface de comunicação com o termostato utilizado nos refrigeradores ou técnicas de controles mais avançadas, porém, o funcionamento e modo como os motores de compressores de capacidade variável são controlados não foge o explicado aqui.

Figura 2.6- Inversor de frequência na caixa



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 2.6 mostra uma foto do produto inversor de frequência utilizado para o estudo da confiabilidade.

Figura 2.7 - Inversor de frequência



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 2.7 mostra a placa eletrônica do inversor montado em sua base (caixa).

### 2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi explicado o sistema de refrigeração, seus principais componentes, as tecnologias de compressores herméticos existentes e seus acionamentos os modos de operação e por fim, o objeto do estudo deste trabalho, os inversores de frequência utilizados em sistemas de refrigeração.

Este capítulo é importante pois é usado como um introdutório para que o leitor possa entender, “do macro ao micro” (do refrigerador ao componente inversor) onde, como e porque os inversores de frequência são utilizados em sistemas de refrigeração.

Também, a abordagem dada ao inversor de frequência como uma eletrônica, serviu para que o leitor tenha um claro entendimento dos modos de funcionamento e principais características do produto em estudo.

No capítulo 3, será tratado todo o referencial teórico da engenharia da confiabilidade, os modelos de confiabilidade, conceitos, a distribuição Weibull, seus conceitos e parâmetros. Também serão abordados os conceitos de ensaios de vida acelerados, cálculos de confiabilidade e relações de vida VS stress.

O capítulo 3 tem o objetivo de explicar a teoria sobre engenharia de confiabilidade que é aplicada ao tipo de produto explicado no capítulo 2. A distribuição Weibull, os fatores de stress considerados em controles eletrônicos e suas energias de ativação são conceitos abordados no capítulo 3 que foram necessários para serem aplicados aos testes e posteriores análises de confiabilidade do objeto de estudo abordado no capítulo 2.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será abordado o referencial teórico da engenharia de confiabilidade aplicada ao estudo aqui proposto que é a análise de dados de vida (LDA) e ensaios de vida acelerados (ALT).

As análises teóricas aqui apresentadas servem de base para o estudo da confiabilidade dos inversores de frequência utilizados em sistemas de refrigeração.

O primeiro conceito que deve ser bem entendido é o conceito de confiabilidade.

O' Connor e Kleyner (2012) definem confiabilidade como:

“a probabilidade que um item tem de realizar uma função requerida sem falhas sob certas condições de aplicação pré-definidas, durante um determinado período de tempo”. (O' Connor e Kleyner, 2012).

Para que seja possível avaliar a confiabilidade de um produto, alguns conceitos de engenharia da confiabilidade são importantes, esses conceitos são apresentados nos capítulos a seguir.

#### 3.1 MODELOS DE CONFIABILIDADE

Geralmente, o comportamento da vida de um produto, taxa de falha, é representado pela tradicional curva da banheira (CYRINO, 2017). Essa curva é modelada representando cada fase da vida do produto e cada fase, pode ser modelada com uma distribuição de vida diferente. A Figura 3.1 mostra a curva da banheira.

Figura 3.1 - Curva da banheira



Fonte: Alterado de manutenção em foco (2017).

Na área representada como 1, é onde a taxa de falha do produto é infantil, ou seja, o produto apresenta falhas prematuras, mostrando que o problema está no design.

A área 2 representa uma taxa de falha constante representando que o produto, possui falhas aleatórias durante o tempo de vida.

A área 3 representa um comportamento de falhas por desgaste, isso acontece com produtos que envelhecem ao longo do uso.

Para cada área da curva da banheira, um ou mais modelos de confiabilidade, ou distribuição de vida, pode ser modelado. Em uma análise de vida de produto, devem-se conhecer os modelos estatísticos de probabilidades usados na engenharia da confiabilidade. Os modelos de probabilidade são usados para que seja possível, com os dados de uma amostragem, analisar o comportamento da população (CYRINO, 2017).

Considerando a curva da banheira, que representa de um modo genérico o comportamento de falha de qualquer produto, pode-se elencar alguns dos principais modelos de confiabilidade que representam alguns comportamentos mostrados acima. Os principais modelos utilizados em engenharia da confiabilidade são:

- Distribuição Weibull (Falhas prematuras, aleatórias, desgaste)
- Distribuição Normal (Falhas por desgaste)
- Distribuição LogNormal (Falhas prematuras, desgaste)

- Distribuição Exponencial (Falhas aleatórias)
- Gama (Falhas prematuras, aleatórias, desgaste). Para análises acima de 150 amostras.
- Gama-G (Falhas prematuras, aleatórias, desgaste). Para amostras acima de 150.
- Logística (Falhas prematuras)
- Loglogística (Falhas prematuras)
- Gumbel (Falhas por desgaste)

(SPANÓ, 2018).

Para efeito desse trabalho, o estudo a seguir contemplará a distribuição Weibull com um pouco mais de aprofundamento por ser a distribuição que mais se adequa à praticamente quase todos os dados, a mais utilizada em análise de vida e a distribuição também utilizada nesse trabalho.

### 3.1.1 Distribuição Weibull

É a distribuição mais usada em análises de confiabilidade, pois é muito flexível, conseguindo modelar as três fases de taxa de falha de produto, ou seja, consegue modelar comportamentos de falhas decrescentes (falhas prematuras), falhas constantes (falhas aleatórias) ou falhas crescentes (falhas por desgaste).

A distribuição Weibull possui três parâmetros:

- $\beta$  é o parâmetro de forma ou inclinação da taxa de falha (Beta);
- $\gamma$  é o parâmetro de localização da primeira falha (Gamma);
- $\eta$  é o parâmetro de escala ou vida característica (Eta);

(SPANÓ, 2018).

O modelamento matemático completo da distribuição Weibull segue na equação 3.1.1.1.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.1.1.1$$

A equação 3.1.1.1 mostra a pdf Weibull de três parâmetros,  $\beta$ ,  $\eta$  e  $\gamma$ . Geralmente, o parâmetro  $\gamma$  não é usado, isso faz com que esse parâmetro seja reduzido a zero (HBM PRENSCIA INC, 2019). Nesse caso, a equação da pdf é reduzida à equação Weibull de dois parâmetros, conforme a equação 3.1.1.2.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.1.1.2$$

Um aspecto importante da distribuição Weibull é como os parâmetros  $\beta$  e  $\eta$  afetam as características da distribuição, como por exemplo, a forma da curva da pdf, ou até mesmo a curva de confiabilidade ou taxa de falha do produto.

#### 3.1.1.1 Parâmetro $\beta$

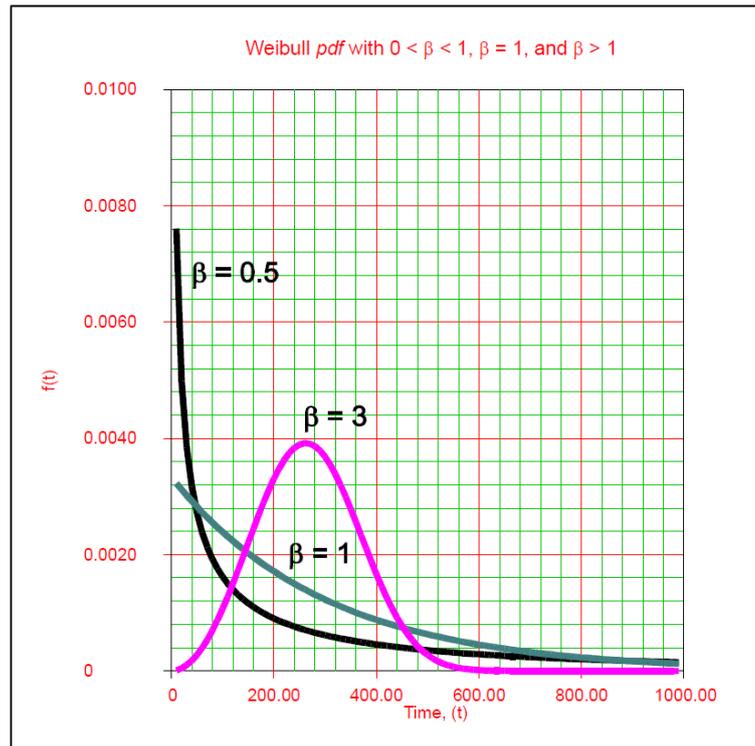
O parâmetro beta pode ser facilmente reconhecido como a forma da subida ou descida da curva da pdf da distribuição Weibull. Valores diferentes de beta refletem em formas diferentes de uma pdf.

Por exemplo:

- Para  $\beta \leq 1$ : A curva da pdf apresenta uma característica de taxa de falha decrescente com o tempo (falhas prematuras);
- Para  $\beta = 1$ : A curva da pdf apresenta uma taxa de falha constante com o tempo (falhas aleatórias);
- Para  $\beta \geq 1$ : A curva da pdf apresenta uma taxa de falha crescente com o tempo (falhas por desgaste).

A Figura 3.2 apresenta exemplos de pdf de considerando diferentes valores de beta na distribuição Weibull. É possível verificar que o parâmetro beta, claramente define o comportamento das falhas do produto ao longo do tempo.

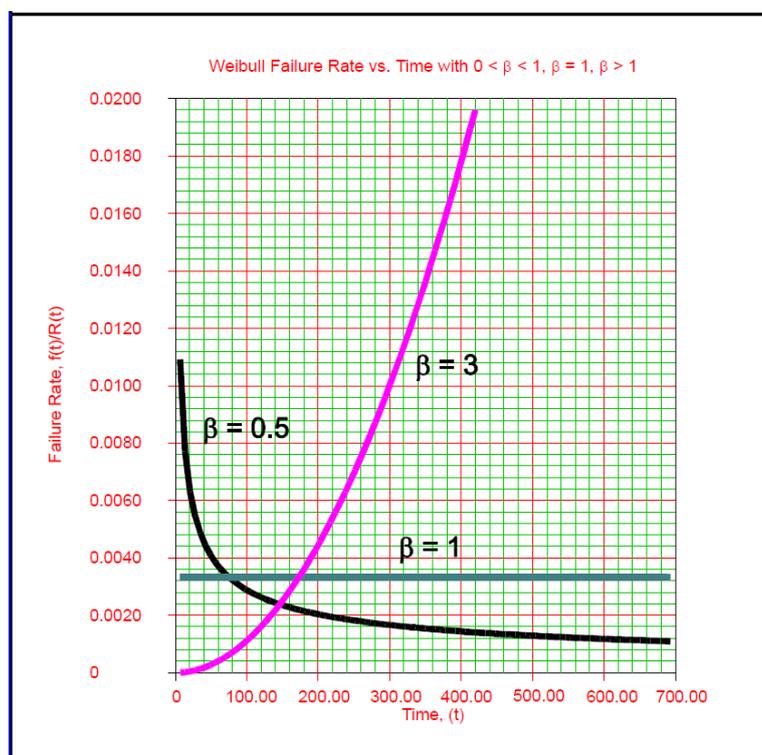
Figura 3.2 - Efeito do parâmetro beta na curva pdf de uma distribuição Weibull



Fonte: Curso Reliasoft (2007).

Uma outra forma de se verificar como o parâmetro beta influencia os efeitos na taxa de falha. A Figura 3.3 apresenta exemplos de curvas de taxas de falha considerando diferentes valores de beta na distribuição Weibull.

Figura 3.3 - Efeito do parâmetro beta na curva de taxa falha de uma distribuição Weibull



Fonte: Curso Reliasoft (2007).

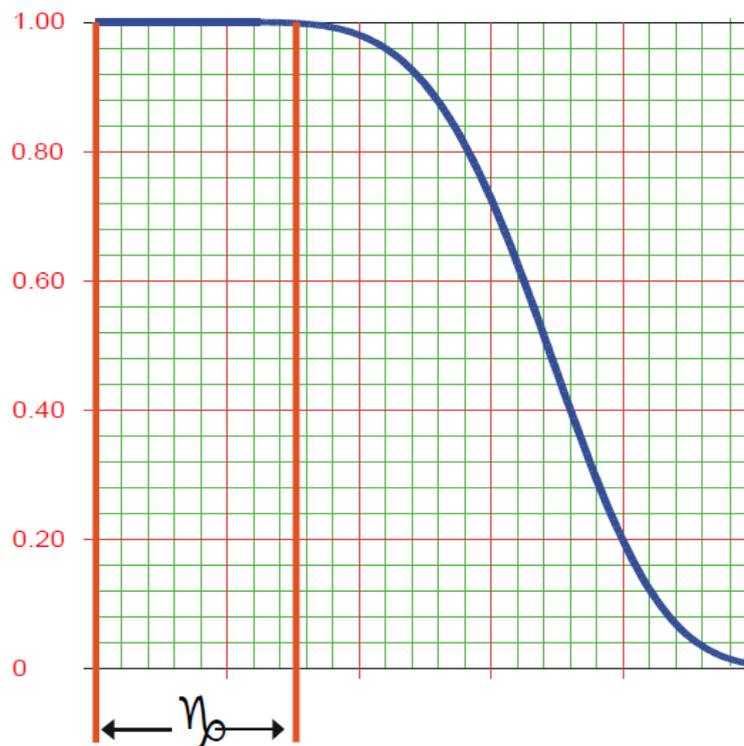
### 3.1.1.2 Parâmetro $\gamma$

O parâmetro gama da distribuição Weibull é o parâmetro de localização que representa um deslocamento do comportamento da distribuição no eixo x, ou seja, muda o tempo de início da distribuição para valores diferentes de zero.

Em outras palavras, o parâmetro gama, mostra onde basicamente iniciam as falhas do produto, por exemplo, um gama que inicia em um tempo  $T$  de 100 h significa que de  $T=0$  h até  $T=99$  h nenhuma falha de produto ocorrerá, então, de 0 h até 99 h, a confiabilidade do produto é 100%.

A Figura 3.4 representa uma curva de confiabilidade sendo influenciada pelo parâmetro gama. É possível verificar que a confiabilidade é igual a 100% até o valor do parâmetro gama (RELIASOFT, 2007).

Figura 3.4 - Efeito do parâmetro gama na curva de confiabilidade de uma distribuição Weibull



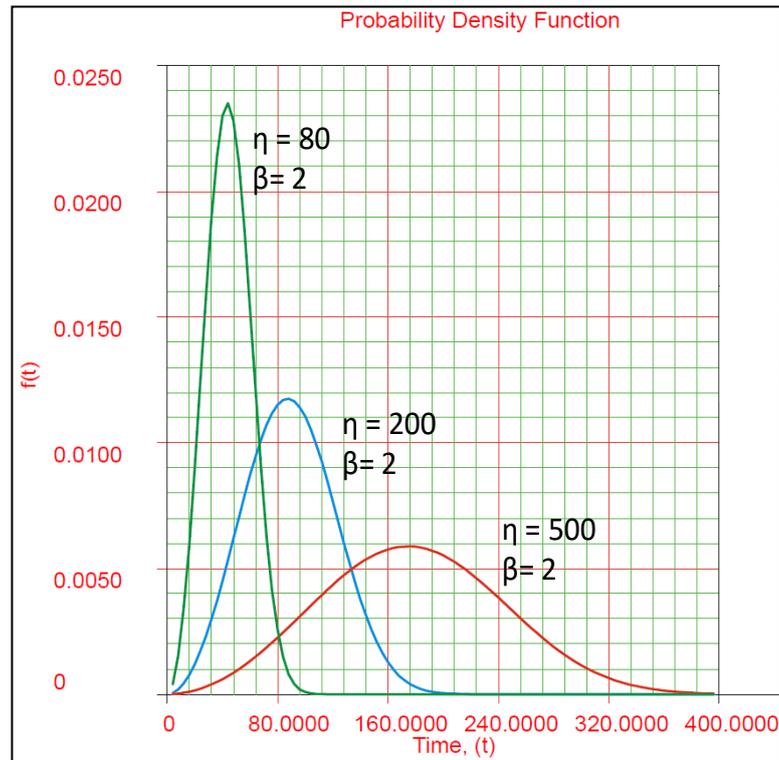
Fonte: Curso Reliasoft (2007).

### 3.1.1.3 Parâmetro $\eta$

O parâmetro  $\eta$  é o parâmetro de escala da distribuição Weibull, possui a mesma unidade de  $T$ , como horas, quilômetros, ciclos etc.

A Figura 3.5 mostra como diferentes valores de  $\eta$  influenciam no formato da curva pdf da distribuição.

Figura 3.5 - Efeito do parâmetro gama na curva de confiabilidade de uma distribuição Weibull



Fonte: Curso Reliasoft (2005).

Facilmente é possível notar que:

- Caso  $\eta$  seja incrementado, enquanto  $\beta$  e  $\gamma$  são mantidos o mesmo, a distribuição é "esticada" para a direita do gráfico enquanto o pico da pdf é "achatado", mas o formato ( $\beta$ ) e a localização ( $\gamma$ ) não mudam;
- Caso  $\eta$  seja decrementado, enquanto  $\beta$  e  $\gamma$  são mantidos o mesmo, a distribuição é "encolhida" para a esquerda do gráfico enquanto o pico da pdf é "esticado" para cima, mas o formato ( $\beta$ ) e a localização ( $\gamma$ ) não mudam;

#### 3.1.1.4 Métricas da confiabilidade.

Com a distribuição Weibull e seus parâmetros, é possível se obter as principais métricas da confiabilidade conforme segue:

A função Weibull de confiabilidade é dada por:

$$R(T) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad 3.1.1.3$$

Onde:

$R(T)$  = Confiabilidade no tempo  $t$ ;

$t$  = Tempo de falha das amostras;

$\gamma$  = Parâmetro gama;

$\eta$  = Parâmetro de escala;

$\beta$  = Parâmetro de forma.

A função Weibull da taxa de falha é dada por:

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad 3.1.1.4$$

Onde:

$\lambda(T)$  = Taxa de falha;

$f(T)$  = Função densidade de probabilidade;

A função Weibull de tempo médio até a falha (MTTF) é dada por:

$$T = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad 3.1.1.5$$

Onde:

$\Gamma$  = Função gama;

## 3.2 ENSAIOS DE VIDA ACELERADOS

O conceito de um ensaio de vida acelerado pode ser explicado como a possibilidade de comprimir o tempo de vida do produto, submetendo-o a fatores de estresses acima dos valores encontrados pelo produto quando submetido ao uso normal em campo. Esses estresses aplicados durante os ensaios são os mesmos que aceleram os mecanismos de falha do produto em campo a diferença é sua magnitude.

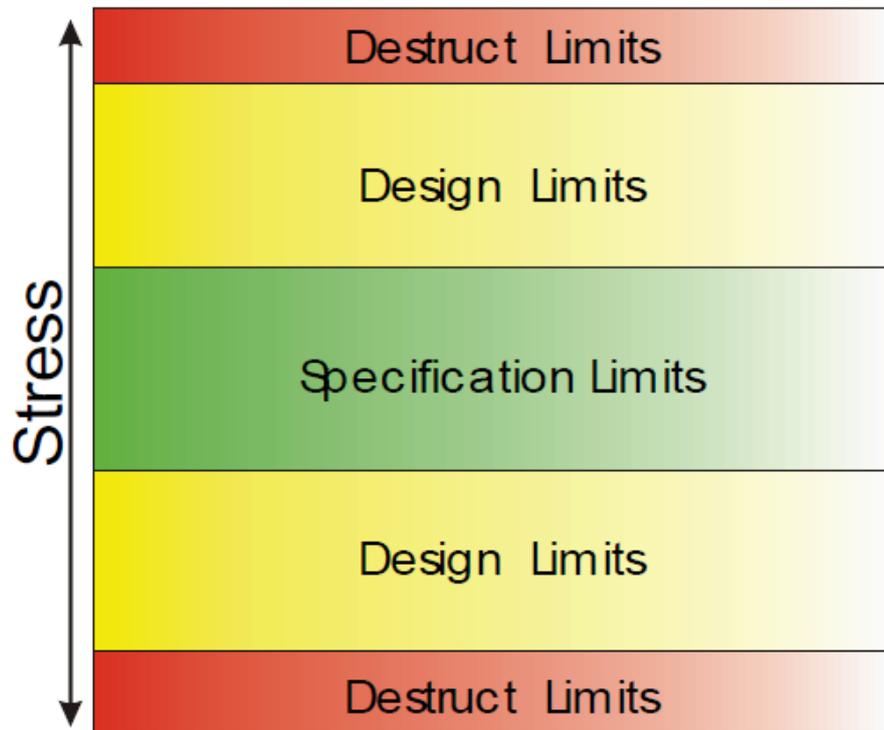
### 3.2.1 Modelos de ensaios de vida acelerados

Existem dois conceitos de ensaios acelerados de vida, o ensaio acelerado qualitativo e o ensaio acelerado quantitativo.

### 3.2.2 Ensaio de vida acelerado qualitativo

Este modelo de ensaio tem o principal objetivo de revelar o modo de falha e o ponto fraco do produto. São ensaios realizados em quantidades pequenas de amostras, pois não possuem o objetivo de se analisar estatisticamente os dados. Ensaios qualitativos são geralmente conhecidos como ensaios de torturas, mais especificamente, e tecnicamente, denominados como HALT ou HAST. Suas falhas, não consideram a variável tempo como resposta, ou seja, nesses ensaios, a confiabilidade não é analisada, mas sim a robustez do produto. Também, como esses tipos de ensaios colocam o produto muito acima de seus limites de operação, chegando aos limites destrutivos, as falhas que ocorrem no produto, não necessariamente serão as falhas que serão encontradas durante o uso normal (ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q., 2006. e CONNOR, O., 2012).

Figura 3.6 - Limites dos níveis de estresses de um produto



Fonte: Spanó (2017).

A Figura 3.6 apresenta como podemos aplicar os níveis de stress em um produto. A faixa dos limites destrutivos (Destructive Limits), é onde os ensaios de HAST são realizados. Pode se então facilmente notar, que esses ensaios submetem o produto a níveis de stress muito acima dos limites de operação.

Esses estresses podem ser, por exemplo, temperatura, umidade, tensão, corrente, vibração, testes combinados (temperatura com vibração) dentre outros.

### 3.2.3 Ensaios de vida acelerado quantitativo

Este modelo de ensaio tem o principal objetivo de se obter as métricas de confiabilidade de um produto submetendo um número de amostras pré definidas as mesmos estresses que o produto é submetido em operação normal, porém, com níveis mais elevados. Pode-se analisar novamente a Figura 3.6 para melhor entendimento, os ensaios de vida quantitativos aplicam níveis de stress dentro das áreas especificadas como limites operacionais (*Design Limits*) (ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q., 2006. e CONNOR, O., 2012).

Esses ensaios, diferentemente dos ensaios qualitativos, possuem a variável tempo até a falha como um dado principal, pois com os tempos até a falha e o fator de aceleração conhecido do ensaio é possível adquirir as métricas de confiabilidade como, curva de confiabilidade, taxa de falha, tempo médio até a falha, dentre outras.

É importante salientar que aqui, os modos de falhas possivelmente serão os mesmos que serão encontrados em campo, bem como a extrapolação do tempo de teste para a operação normal.

Em um ensaio de vida acelerado bem delineado, o engenheiro de confiabilidade escolhe um ou mais fatores de aceleração que geralmente causa as falhas do produto em uso normal, por exemplo, temperatura. Após isso, é aplicado o stress em níveis acima dos níveis encontrados no campo e esperam-se os dados de tempos até a falha durante o ensaio. Por exemplo, se o produto em campo pode operar em temperatura ambiente de até 60 °C, o teste é realizado acima desse nível, pois o objetivo aqui é acelerar a falha. Após os dados coletados, com a aplicação das distribuições estatísticas relevantes, é possível obter a descrição da distribuição de vida do produto do tempo até a falha. Estatisticamente, a intenção é obter a pdf dos tempos até a falha, e assim que a pdf é obtida, todas as outras métricas de confiabilidade podem ser obtidas.

### 3.3 VARIÁVEIS DE ESTRESSES

Uma variável de stress nada mais é do que a grandeza física aplicada ao produto em níveis acima dos encontrados pelo produto em campo (ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q., 2006., CONNOR, O., 2012., e CROWE, D., 2001).

Neste trabalho, será abordado duas grandezas físicas consideradas variáveis significantes de stress em produtos eletroeletrônicos: Temperatura e Umidade.

### 3.3.1 Temperatura

É a grandeza física mais significativa quando o produto em avaliação é um produto eletroeletrônico. Ensaio que aplicam somente temperatura são geralmente denominados como modelos HTOL (*High Temperature Operation Life*). Os produtos são submetidos a temperaturas acima dos valores de operação normal durante um certo tempo até que uma quantidade mínima de falhas, que possibilite a condução de análises estatísticas seja coletada.

Normalmente, é assumido que os mecanismos de falha seguirão a clássica relação de vida stress de Arrhenius. A relação de Arrhenius é comumente utilizada para se estimar o fator de aceleração da temperatura. Esse modelo requer que se conheça a temperatura de uso normal do produto e a temperatura de teste. Com a diferença entre essas duas temperaturas e a energia de ativação conhecida, é possível quantificar o fator de aceleração do teste. A equação de Arrhenius é apresentada abaixo:

$$R = A \cdot \exp \left[ -\frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad 3.3.1.1$$

A partir da equação 3.3.1.1 é possível equacionar o fator de aceleração de um teste conforme segue:

$$AF = \frac{R_{teste}}{R_{uso}} = \frac{A \cdot \exp \left[ -\frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_t} \right) \right]}{A \cdot \exp \left[ -\frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_u} \right) \right]} \quad 3.3.1.2$$

$$AF = \exp \left[ \frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad 3.3.1.3$$

Onde:

R = Taxa de reação da matéria;

AF = Fator de aceleração da temperatura;

$E_a$  = Energia de ativação;

$K_b$  = Constante de Boltzman ( $8.6173 \times 10^{-5}$  eV);

$T_u$  = Temperatura de uso (em Kelvin);

$T_t$  = Temperatura de teste (em Kelvin).

O cálculo do fator de aceleração define o tempo do mesmo, bem como o quanto o ensaio está acelerando a vida do produto durante o tempo que o mesmo está sendo submetido ao ensaio, é um número adimensional.

### 3.3.1.1 Energia de ativação

A definição da energia de ativação, segundo O' Connor é:

A energia de ativação veio da química e física. Ela corresponde a menor energia requerida pelo elétron para movê-lo para um nível diferente de energia e iniciar uma reação química. É importante notar que embora a energia de ativação possui um significado específico, como uma propriedade atômica ou do material, na equação de Arrhenius, ela simplesmente se torna uma constante empírica apropriada para o uso com um particular mecanismo de falha (O' Connor, 2012).

Portanto, em outras palavras, “a energia de ativação também pode ser definida como a energia necessária para se iniciar uma reação química no material que esta sob ensaio” (O' CONNOR, 2012).

Sua unidade de medida é o eV (elétron-volt).

#### 3.3.1.1.1 Obtenção da energia de ativação

A energia de ativação pode ser obtida através de dois principais métodos:

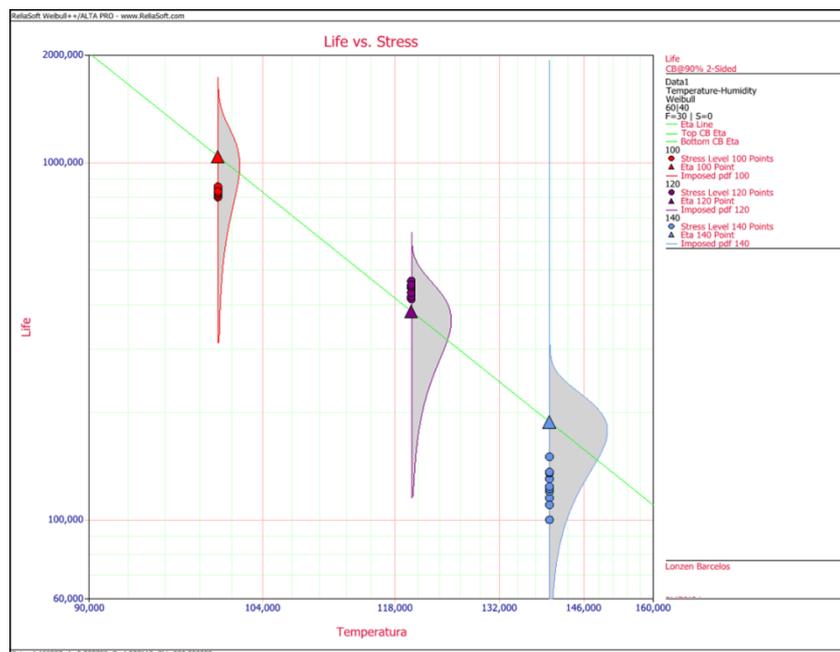
- Por meio de uma série de ensaios de vida acelerado

- Por meio de valores sugeridos em literatura para diferentes mecanismos de falhas

### 3.3.1.1.1.1 Obtenção por meio de ensaios

O método mais acurado de se obter a energia de ativação de um produto, componente ou sistema é através de uma série de ensaios e registro de seus tempos de falhas em função da temperatura (CROWE, 2001). Por exemplo, a Figura 3.7 mostra três ensaios de vida acelerados em um produto, seus tempos de falhas foram registrados e com o auxílio do software Weibull++<sup>®</sup> é possível, além de se obter várias métricas de confiabilidade, a energia de ativação da temperatura no produto conforme mostra a Figura 3.8

Figura 3.7 - Ensaios de vida acelerado



Fonte: O autor (2019).

A Figura 3.8 apresenta de forma numérica, o valor exato da energia de ativação obtida com os ensaios.

Figura 3.8 - Parâmetros da distribuição Weibull

The screenshot shows the 'STANDARD FOLIO' software interface. The 'Model' dropdown is set to 'TH-Weibull'. The 'Analysis Settings' table shows 'MLE', 'FM', and 'F=30/S=0'. The 'Analysis Summary' table lists parameters: Beta (4,468957), A (Yr) (2,333758), B (4,237113), Phi (599,320355), Ea (0,051646), Eta (Yr) (56504,766011), and LK Value (-177,706527). The 'Activation Energy' (Ea) row is highlighted with a red box.

Analysis Settings	
MLE	
FM	
F=30/S=0	

Analysis Summary	
<b>Parameters</b>	
Beta	4,468957
A (Yr)	2,333758
B	4,237113
Phi	599,320355
<b>Activation Energy</b>	
Ea	0,051646
<b>Scale Parameter (at Use Stress)</b>	
Eta (Yr)	56504,766011
<b>Other</b>	
LK Value	-177,706527

Fonte: O autor (2019).

Como é possível verificar, com os ensaios acelerados em diferentes condições de níveis de stress, é possível se obter o valor da energia de ativação exata para o produto em avaliação, sendo assim, um procedimento bem mais acertivo do que o método utilizando valores em literatura.

#### 3.3.1.1.1.2 Por meio de valores sugeridos em literatura

Um método muito utilizado na indústria é a obtenção do valor de energia de ativação em literatura disponível. Esse método é usado pelo simples motivo de que, como o método anterior apesar de ser o mais preciso, necessita de uma série de testes, isso significa custos mais elevados com os ensaios, recursos de estruturas pesadas de testes e tempos de desenvolvimentos mais longos.

Quando se admite um valor de energia de ativação pré-determinado, é possível, durante o processo de desenvolvimento de produto, já realizar o ensaio de vida acelerado considerando a energia de ativação estabelecida, tornando assim os custos mais acessíveis no desenvolvimento de produto e ainda assim, com a

possibilidade de se determinar algumas métricas de confiabilidade em apenas um ensaio. (CROWE, D., 2001 e CONNOR, O., 2012)

Em O' Connor (2012), uma lista de valores de energia de ativação para diferentes mecanismos de falha é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Energias de ativação comumente usadas para diferentes mecanismos de falha

Mecanismo de falha	Energia de ativação (eV)
<i>Gate oxide defect</i>	0.3–0.5
<i>Bulk silicon defects</i>	0.3–0.5
<i>Silicon junction defect</i>	0.6–0.8
<i>Metallization defect</i>	0.5
<i>Au-Al intermetallic growth</i>	1.05
<i>Electromigration</i>	0.6–0.9
<i>Metal corrosion</i>	0.45–0.7
<i>Assembly defects</i>	0.5–0.7
<i>Bond related</i>	1.0
<i>Wafer fabrication (chemical contamination)</i>	0.8–1.1
<i>Wafer fabrication (silicon/crystal defects)</i>	0.5–0.6
<i>Dielectric breakdown, field &gt; 0.04 micron thick</i>	0.3
<i>Dielectric breakdown, field ≤ 0.04 micron thick</i>	0.7
<i>Adhesive tack: bonding-debonding</i>	0.65–1.0

Fonte: O' Connor (2012).

Uma outra lista mais completa de energias de ativação para diferentes mecanismos de falha para componentes eletrônicos usada como referência pode ser encontrada na norma JEP122D (2009).

Dependendo do tipo de produto ou componente a ser avaliado, o engenheiro de confiabilidade pode assumir um dos valores acima para a energia de ativação.

### 3.3.2 Modelo Eyring e modelo Peck's modelo de temperatura-umidade

Uma variação do modelo de Eyring foi proposta por Peck (1986). A equação é provavelmente a mais usada e conhecida como modelo de aceleração combinado considerando temperatura e umidade.

Primeiramente, é importante apresentar o modelo de Eyring que é aplicado de forma geral para combinar o efeito de mais de uma variável de stress independente assumindo-se que elas não possuem interações entre elas. (RELIASOFT, 2008)

$$AF = A \cdot \exp \left[ -\frac{Ea}{kt} \cdot Y_1(stress\ 1) \cdot Y_2(stress\ 2) \right] \quad 3.3.2.1$$

Onde:

$Y_1(stress\ 1) \cdot Y_2(stress\ 2)$ : são fatores para outros estresses aplicados, como: temperatura, umidade, tensão, vibração, etc.

A: é uma constante que deve ser conhecida ou estimada (RELIASOFT, 2008).

### 3.3.3 Umidade

Outra grandeza física de impacto significativo em produtos eletroeletrônicos é a umidade. Em produtos onde usam metais, eletrólitos, circuitos integrados e similares, a umidade pode ser catastrófica.

Umidade pode causar falhas como:

- Corrosão química no caso de já existir alguma contaminação já presente;
- Corrosão eletrolítica, no caso de um eletrólito se usado;
- Curto circuito em placas de circuito impressor;
- Delaminação de circuitos integrados;

(O' CONNOR, 2012)

Com base no modelo Eyring da equação 3.3.2.1, a equação de Peck considerando umidade e temperatura é descrita abaixo:

$$AF = \left(\frac{RH_t}{RH_u}\right)^m \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k_b} \cdot \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right] \quad 3.3.3.1$$

Onde:

AF = Fator de aceleração da temperatura;

RH<sub>t</sub> = Umidade Relativa do teste;

RH<sub>u</sub> = Umidade Relativa de uso;

m = Constante de potência da umidade, usualmente variando de 2,0 à 4,0.

E<sub>a</sub> = Energia de ativação;

K<sub>b</sub> = Constante de Boltzman (8.6173 x 10<sup>-5</sup> eV);

T<sub>u</sub> = Temperatura de uso (em Kelvin);

T<sub>t</sub> = Temperatura de teste (em Kelvin).

Na indústria eletrônica, o valor de 2,66 é utilizado como referência considerando falhas de componentes eletrônicos por corrosão ou óxidos nos semicondutores (HALLBERG e PECK, 1991).

### 3.4 TIPOS DE DADOS

Um conhecimento importante sobre os dados de ensaios de vida acelerados é como classificá-los e trabalhar com os mesmos.

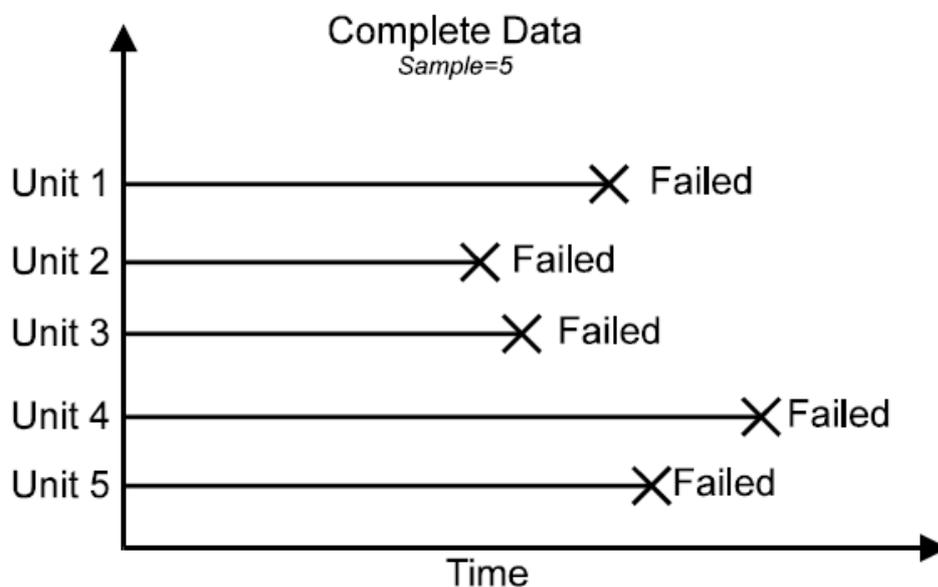
Os modelos estatísticos dependem basicamente dos dados para que seja possível avaliar algumas predições e por isso, a acuracidade dos dados é de suma importância. Em um ensaio de vida acelerado, as análises geralmente são conduzidas com qualquer tipo de dado disponível e em alguns casos, acontece que o engenheiro de confiabilidade possui alguns (ou todos) dados incompletos ou com baixa acuracidade do tempo de falha do produto. Essas possibilidades são geralmente uma regra, pois em alguns ensaios de vida acelerado, não se dispõe de equipamentos suficientes ou tecnologias capazes de monitorar os produtos sob

testes durante 100% do tempo, na tentativa de se conhecer o momento exato que o produto em teste falhou. Por isso, os dados de vida podem ser divididos em dois tipos principais: dados completos e dados censurados (RELIASOFT, 2007).

#### 3.4.1 Dados Completos

Os dados completos são aqueles em que o engenheiro de confiabilidade conhece o exato momento da falha do produto. Por exemplo, um produto submetido ao ensaio de vida acelerado está sendo monitorado automaticamente durante 24h por dia sete dias por semana, com uma taxa de aquisição do dado a ser avaliado consideravelmente baixa (por exemplo a cada 10 seg.). Isso significa que se o produto falhar, o erro máximo que o dado irá apresentar é de 10 seg. (RELIASOFT, 2007).

Figura 3.9 - Dados completos até a falha



Fonte: Treinamento Reliasoft (2007).

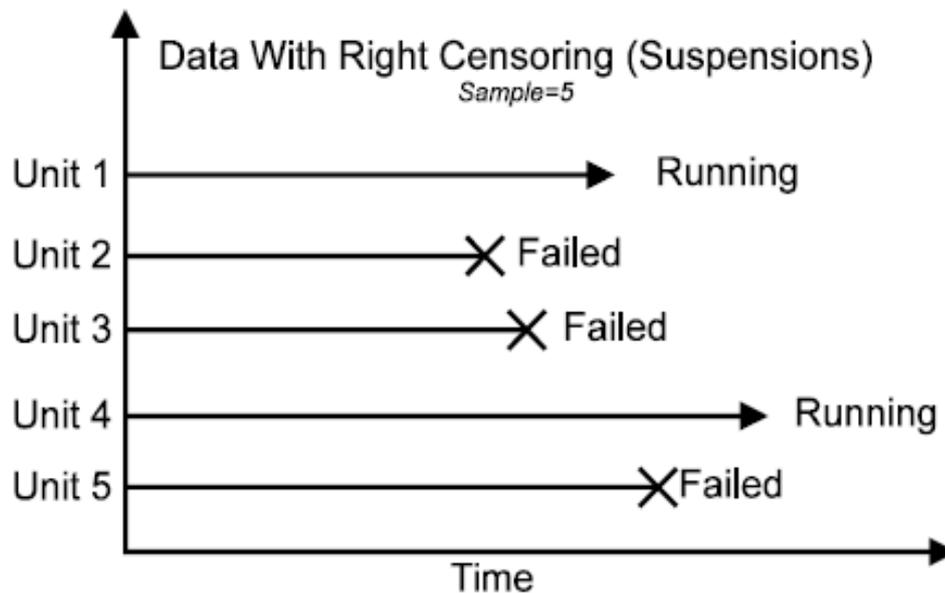
### 3.4.2 Dados Censurados

Em ensaios de vida acelerados, não necessariamente todos os produtos em testes falharão ou o monitoramento é feito durante 24h por dia 7 dias por semana. Para esses casos, os dados do tipo censurados são usados em análises de dados de vida. Existem três tipos de dados censurados: censurados à direita (suspensões), censurados em intervalos ou censurados à esquerda (RELIASOFT, 2007).

#### 3.4.2.1 Dados censurados à direita

Esse tipo de dado é usado quando nem todos os produtos em teste falham, ou sejam, ao final do teste ainda existem produtos funcionando. Esses produtos funcionando não podem simplesmente serem expurgados das análises, pois estatisticamente, são amostras que não falharam e “participam da capacidade de sucesso do produto” (RELIASOFT, 2007).

Figura 3.10 - Dados censurados à direita

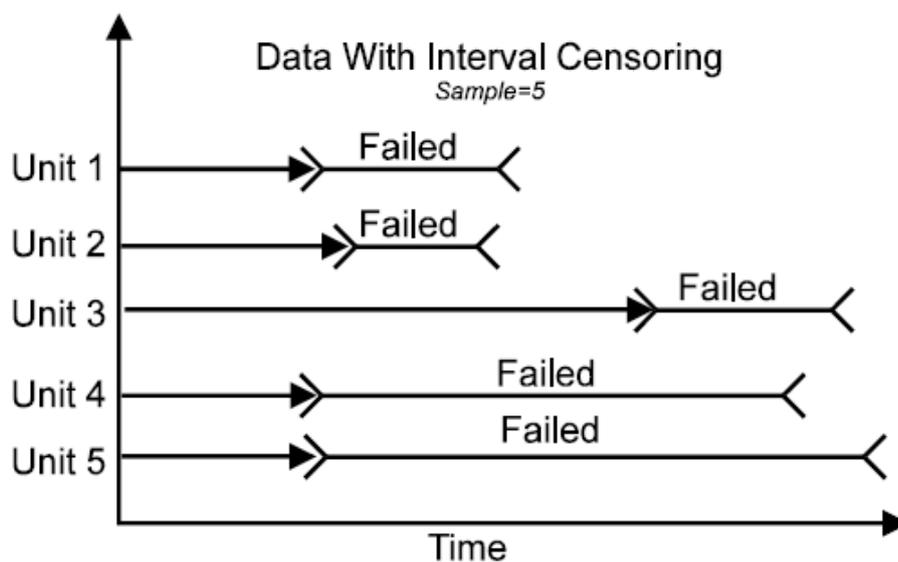


Fonte: Treinamento Reliasoft (2007).

#### 3.4.2.2 Dados censurados em intervalos

Esse tipo de dado é usado quando não se conhece exatamente o momento da falha do produto em teste, ou seja, o monitoramento do produto em teste não é realizado automaticamente (24h por dia, 7 dias por semana). Com isso, tem-se uma incerteza no tempo exato até a falha e quando isso acontece, usa-se os dados censurados em intervalo para as análises de vida.

Figura 3.11 - Dados censurados em intervalos

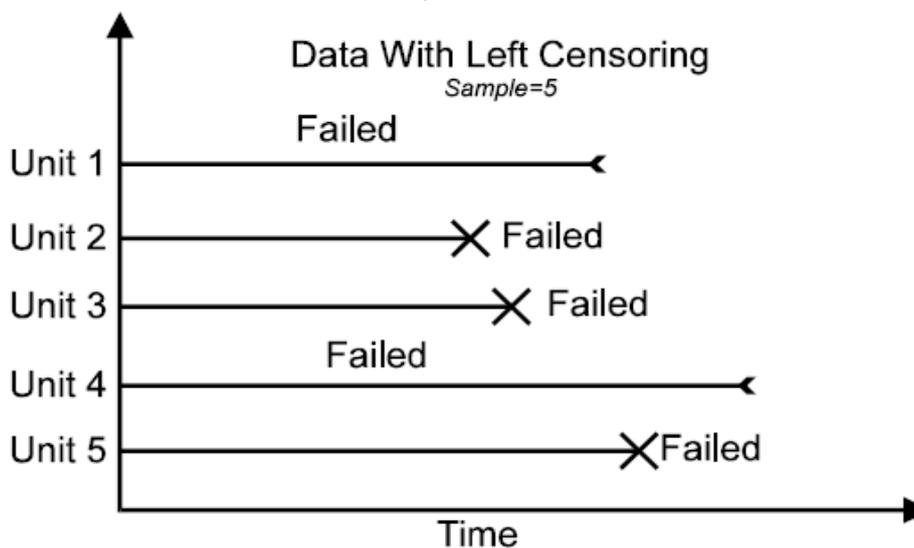


Fonte: Treinamento Reliasoft (2007).

#### 3.4.2.3 Dados censurados à esquerda

Esses dados são usados quando o produto foi encontrado já em falha após um certo tempo, porém, o exato momento até a falha é desconhecido (RELIASOFT, 2007).

Figura 3.12 - Dados censurados à esquerda



Fonte: Treinamento Reliasoft (2007).

### 3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi explicado todo o referencial teórico da engenharia da confiabilidade, os modelos de confiabilidade, conceitos, a distribuição Weibull e seus parâmetros. Também foi abordado os conceitos de ensaios de vida acelerados, cálculos de confiabilidade e relações de vida VS stress.

O capítulo tem sua importância clara pois os conceitos de engenharia da confiabilidade devem estar claros para o leitor, para que se tenha um pleno entendimento do objetivo do trabalho e da aplicação da teoria nas análises de confiabilidade.

O presente capítulo também abordou de forma abrangente, dois possíveis métodos de análises de confiabilidade, por meio de ensaios para obtenção da energia de ativação do produto/componente ou por meio de dados disponíveis na literatura.

O capítulo 4 tratará o produto apresentado no capítulo 2 e aplicará os conceitos apresentados no capítulo 3.

## 4. APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o ensaio de vida acelerado aplicado aos inversores de frequência utilizando o referencial teórico abordado como base para as análises dos dados.

### 4.1 DESCRIÇÃO E PROCEDIMENTO DO ENSAIO

A estrutura do ensaio de vida acelerado utilizada é descrita abaixo:

- Sessenta inversores na versão 115 V (alimentação)
- Cabos para conexões do compressor e inversor;
- Software criado em LabView para controle e aquisição;
- Câmara climática da Thermotron;
- Micro computador;
- DataLogger Agilent;
- Placa de relés;
- Sessenta compressores;
- Termopares;
- Sessenta resistores SHUNT (para monitoramento do funcionamento do inversor).

Sessenta inversores na versão 115 VAC e com rotação pré estabelecida de 3600 rpm, foram utilizados para a realização do teste. As caixas foram mantidas abertas, sem a tampa e com a abertura no corpo onde é acoplado ao fance do compressor (como mostram as Figura 4.1 e 4.2), permitindo que a eletrônica fosse diretamente exposta ao ambiente da câmara. Este procedimento foi realizado para que o produto estivesse exposto à alta umidade que o teste é conduzido, fazendo com que a mesma permanecesse diretamente em contato com o inversor, isso faz com que o teste se torne mais agressivo do ponto de vista do inversor, pois o contato com a alta umidade pode demonstrar alguns pontos fracos da placa como, baixa qualidade de solda, delaminação na placa, componentes com problemas no encapsulamento etc.

Figura 4.1 - Inversor com a caixa aberta para realização do ensaio



Fonte: O autor (2019).

O Fence do compressor é o metal estampado que forma o encaixe do inversor, o mesmo é soldado no compressor e ele possibilita que o inversor, seja acoplado ao compressor na montagem final.

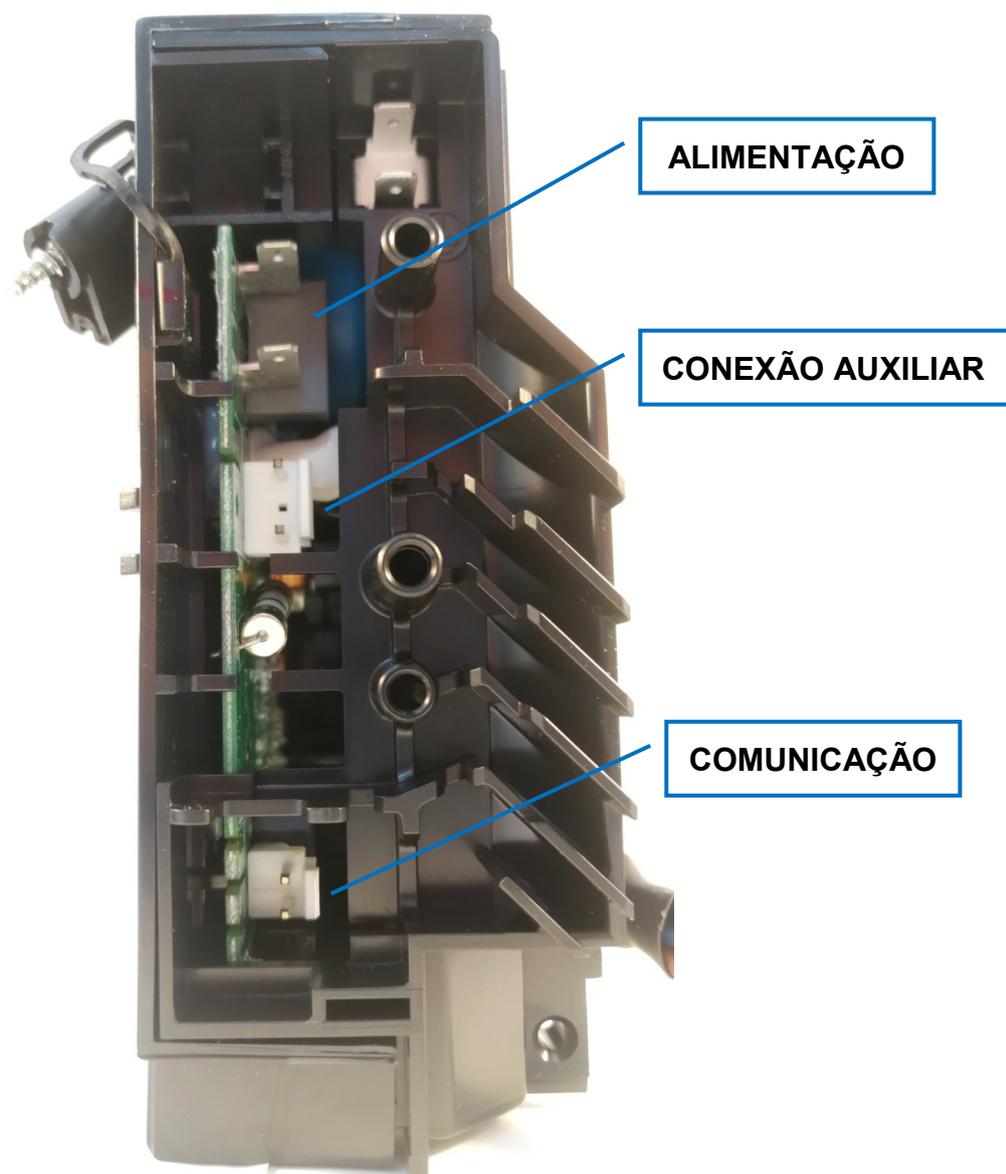
Figura 4.2 – Fence do compressor



Fonte: O autor (2019).

As conexões do inversor são apresentadas na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Conexões do inversor



Fonte: O autor (2019).

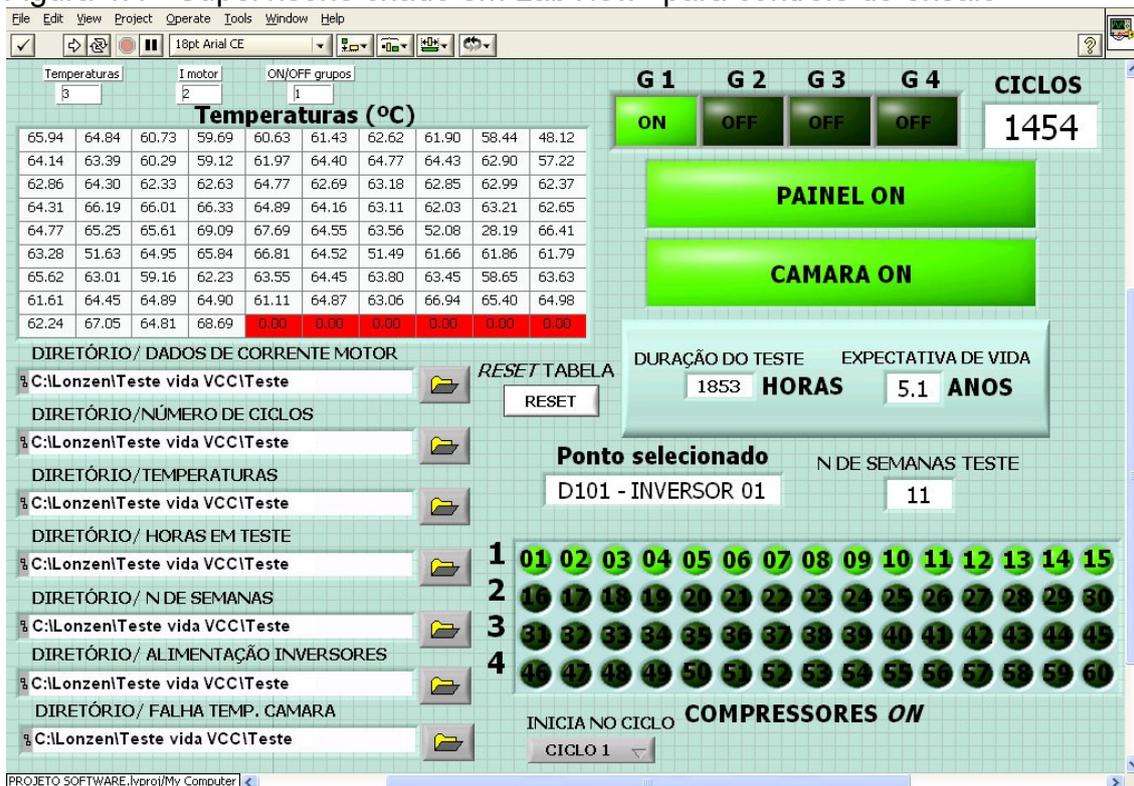
Onde:

- **Alimentação:** Terminais de alimentação do inversor;
- **Conexão Auxiliar:** Interligada com a alimentação, usada por clientes para alimentação do termostato do refrigerador;
- **Comunicação:** Controle do inversor pelo termostato, modo de liga desliga o compressor e ajuste de velocidade.

Todos os inversores são controlados por um supervisor (Figura 4.4), que em comunicação com o datalogger aciona uma placa de relés (Figura 4.5), confeccionada para simular o termostato na configuração Drop in de contato energizado, ligando e desligando os inversores. Cada inversor possui um relé, sendo o mesmo isolado de todos os demais, que por sua vez aciona os inversores ligando os seus respectivos compressores, simulando então o funcionamento real em campo. O esquema de ligação é mostrado na Figura 4.6 a seguir. Quatro grupos foram criados, cada um com 15 inversores. Cada grupo permanece ligado durante 15 minutos e desligado durante 65 minutos, (Este ciclo é melhor explicado na Figura 4.20).

Os sessenta inversores foram colocados na câmara climática, como mostram as Figuras 4.7 e 4.8. Todas as sessenta placas foram instrumentadas para medição de temperaturas no diodo da posição 101, essa medição, além de ser importante para monitoramento do componente mais quente do inversor (D101), serve também para monitoramento do comportamento dos inversores durante os ciclos de funcionamento e térmico.

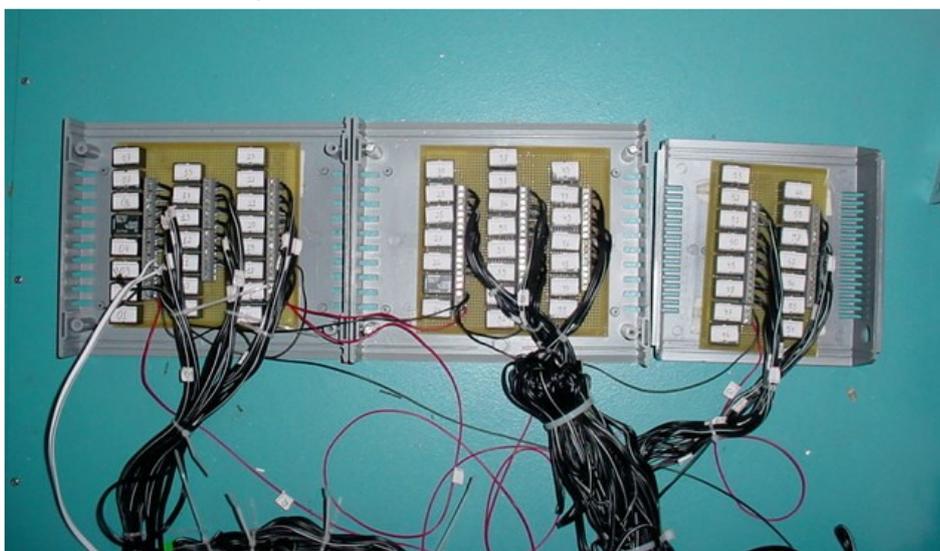
Figura 4.4 - Supervisório criado em LabView® para controle do ensaio



Fonte: O autor (2019).

As placas de relés utilizadas para contralar os ciclos de liga/desliga dos compressores foram montadas conforme Figura 4.5 em uma placa de circuito impresso.

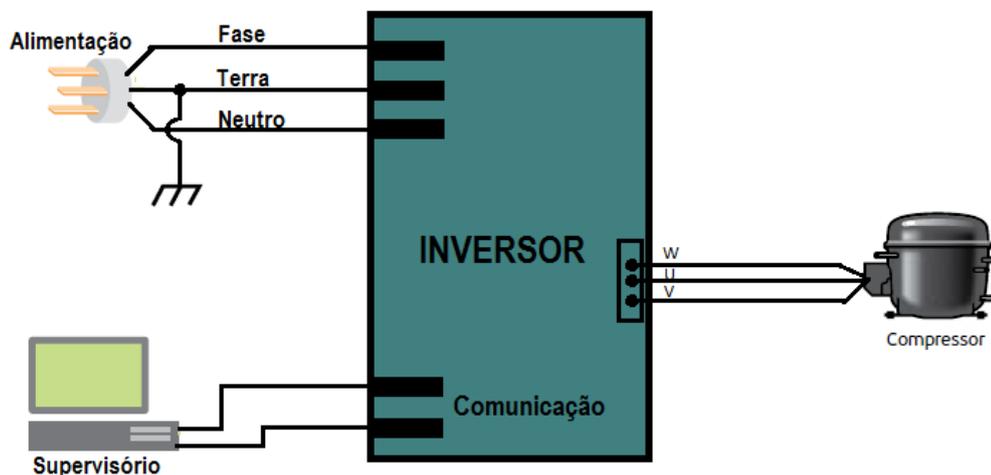
Figura 4.5 - Placa de relés para controle dos inversores



Fonte: O autor (2019).

De forma geral, o esquema de ligação do inversor é bem simples, como é representado na Figura 4.6.

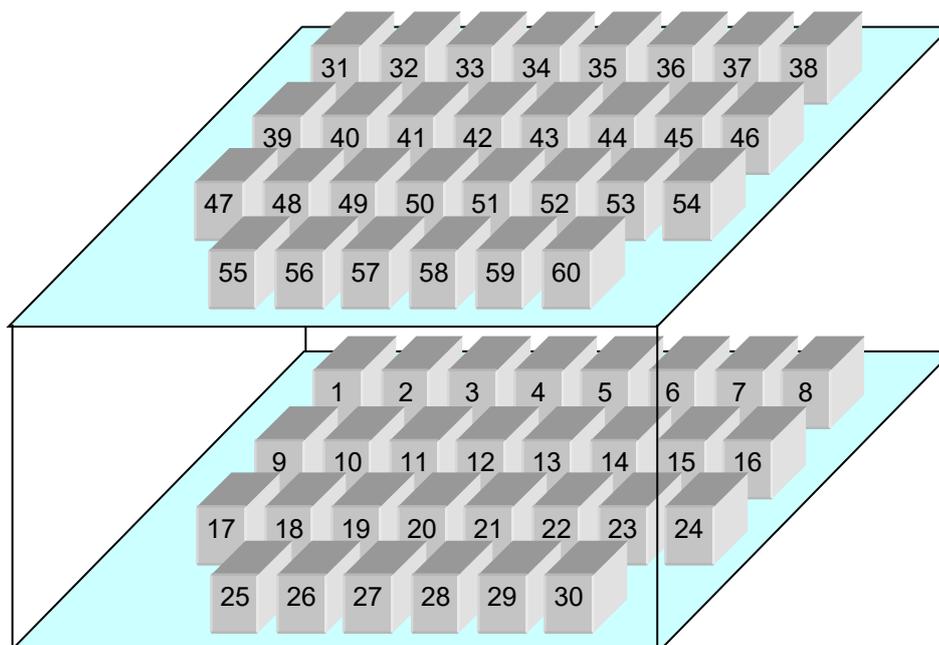
Figura 4.6 - Esquema de ligação do inversor no ensaio



Fonte: O autor (2019).

Todas as amostras de inversores submetidos ao ensaio foram alocadas na câmara climática conforme o esboço ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Disposição dos inversores em câmara



Fonte: O autor (2019).

A foto do teste, com as amostras disponibilizadas na câmara apresenta de forma clara como os inversores foram instalados é apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Amostras de inversores em teste na câmara climática



Fonte: O autor (2019).

A foto da estrutura com as cargas (compressores), disponibilizados ao lado da câmara climática, apresenta de forma clara como os compressores foram instalados.

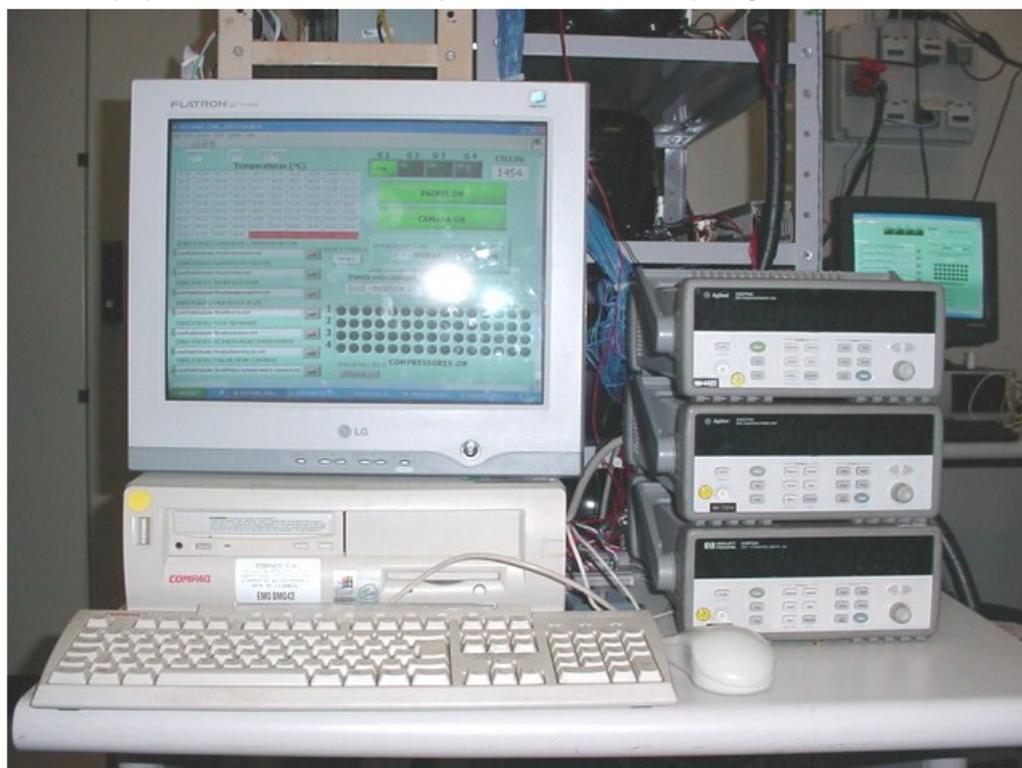
Figura 4.9 - Compressores usados no ensaio



Fonte: O autor (2019).

Computadores e *dataloggers* foram utilizados para o controle de toda a estrutura do ensaio bem como a aquisição dos dados em tempo real durante todo o ensaio.

Figura 4.10 - Equipamentos utilizados para controle e aquisição dos dados do teste.



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.11 apresenta de forma geral, o layout do teste.

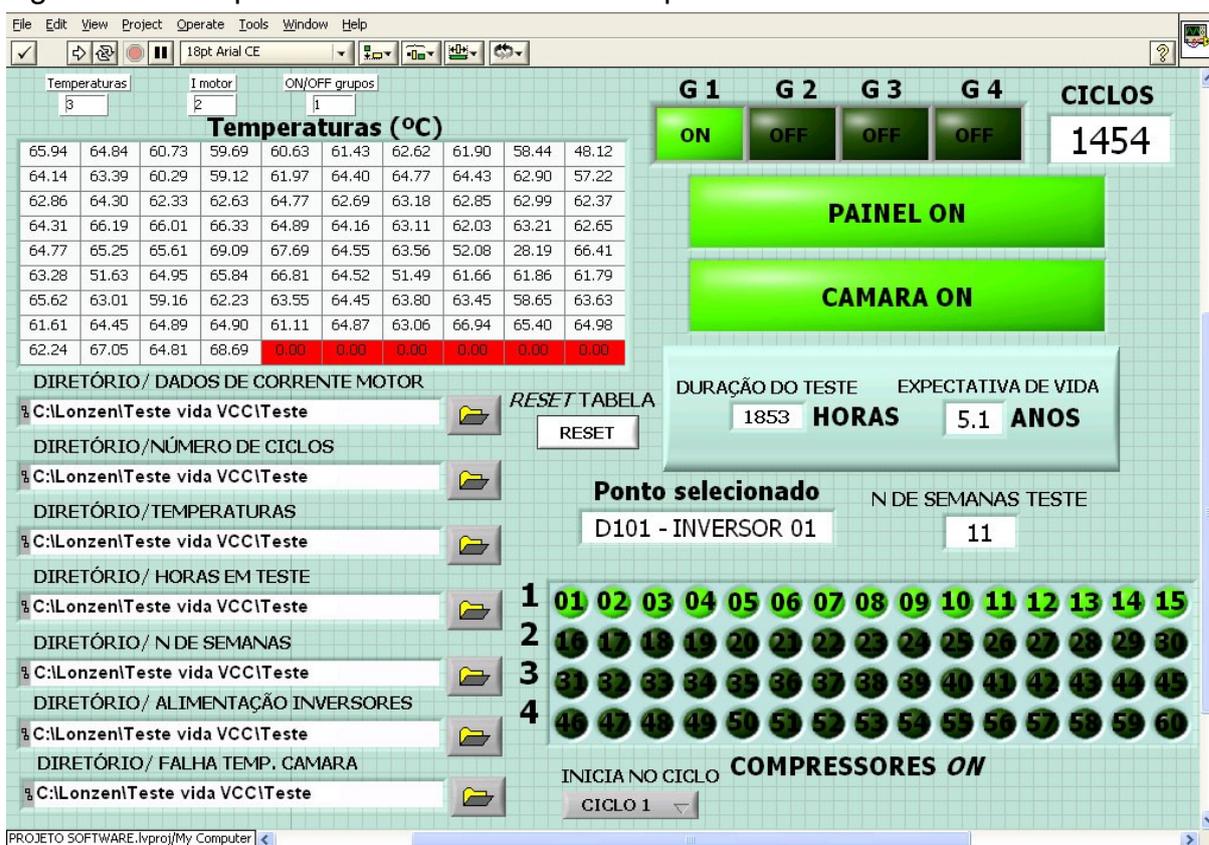
Figura 4.11 - Layout da estrutura de teste

Fonte: O autor (2019).

#### 4.1.1 Descrição e funcionamento do software

Aqui, é feito um breve descritivo do funcionamento do supervisor criado para monitoramento do ensaio, suas funcionalidades e proteções.

Figura 4.12 - Supervisor criado em LabView para controle do ensaio



Fonte: O autor (2019).

A seguir, cada uma das funcionalidades do software é explicada.

Figura 4.13 - Tabela de aquisição das temperaturas

Temperaturas (°C)									
65.94	64.84	60.73	59.69	60.63	61.43	62.62	61.90	58.44	48.12
64.14	63.39	60.29	59.12	61.97	64.40	64.77	64.43	62.90	57.22
62.86	64.30	62.33	62.63	64.77	62.69	63.18	62.85	62.99	62.37
64.31	66.19	66.01	66.33	64.89	64.16	63.11	62.03	63.21	62.65
64.77	65.25	65.61	69.09	67.69	64.55	63.56	52.08	28.19	66.41
63.28	51.63	64.95	65.84	66.81	64.52	51.49	61.66	61.86	61.79
65.62	63.01	59.16	62.23	63.55	64.45	63.80	63.45	58.65	63.63
61.61	64.45	64.89	64.90	61.11	64.87	63.06	66.94	65.40	64.98
62.24	67.05	64.81	68.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.13 mostra as temperaturas nos pontos das placas instrumentadas. As temperaturas são apresentadas e salvas em arquivo, se caso alguma temperatura em algum momento ultrapassar a temperatura máxima permitida, a célula do valor fora do permitido fica em vermelho, indicando o problema e o painel que alimenta o teste é desligado. O teste só retorna quando o operador verificar a falha, e ligar manualmente a alimentação. O tempo de aquisição é de 1 min.

A Figura 4.14 apresenta em tempo real, o grupo que está ligado e o número de ciclos que as placas realizaram até o momento.

Figura 4.14 - Indicador do grupo que está ligado e número de ciclos até o momento



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.15 mostra em tempo real o tempo decorrido de teste, a expectativa de vida até o momento e o número de semanas que o teste está rodando.

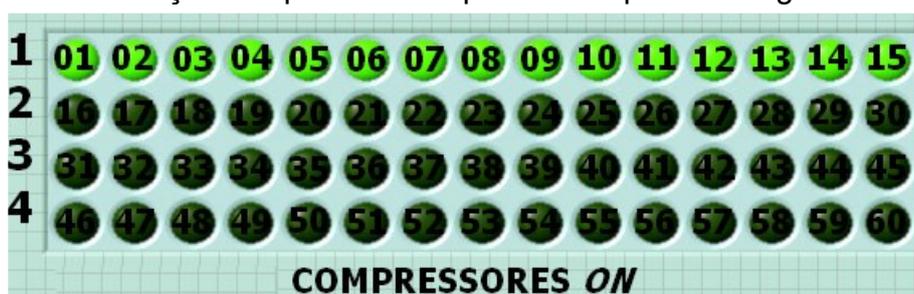
Figura 4.15 - Painel para mostrar o tempo de teste e a expectativa de vida do produto até o momento (Ver cálculo do fator de aceleração)



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.16 mostra a aquisição de corrente dos compressores e indica se todos ligaram corretamente nos seus respectivos grupos, se um compressor ligar fora de seu grupo ou permanecer ligado após o comando off do software, a alimentação do teste é desligada, e um arquivo é criado indicando qual compressor está com problema, o teste só é reiniciado manualmente, após uma análise do problema. O tempo de aquisição é de 3 min. Esse sistema evita que algum inversor permaneça ligado por um tempo fora do estipulado, também, evita que o mesmo ligue, por algum motivo especial, fora de seu tempo específico.

Figura 4.16 - Indicação de quais os compressores que estão ligados



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.17 mostra uma outra funcionalidade criada que é a seleção dos diretórios onde são salvos os arquivos de aquisição do teste, tais como os valores de correntes dos compressores, os pontos de temperaturas, falhas por sobre temperaturas etc.

Figura 4.17 - Seleciona o diretório para salvar os dados



Fonte: O autor (2019).

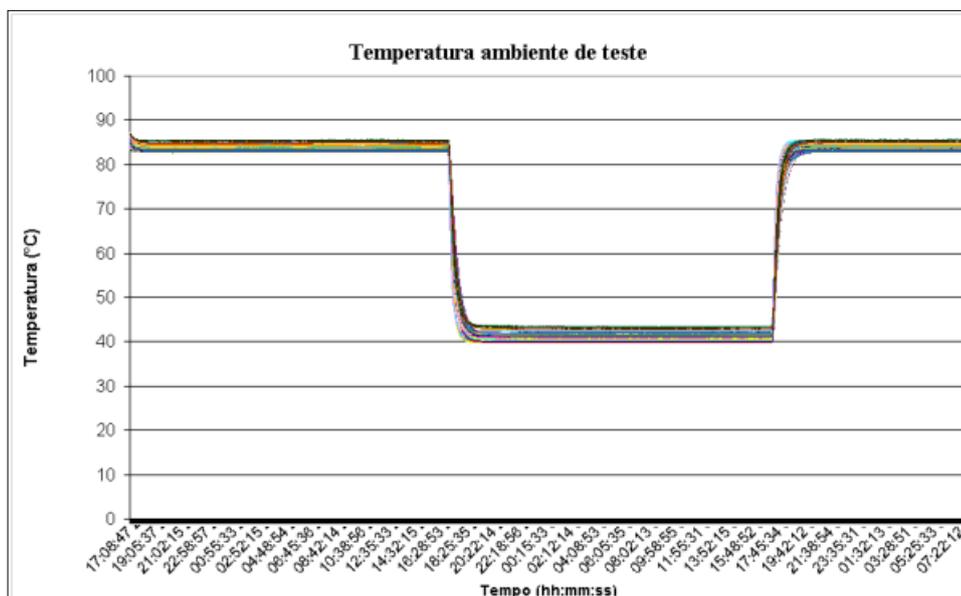
#### 4.1.2 Testes de validação do software e estrutura

Para certificar-se de que as proteções e aquisições executadas pelo software estavam funcionando perfeitamente, alguns testes foram executados como seguem abaixo:

##### 4.1.2.1 Calibração dos termopares

Com o intuito de conhecer o erro máximo dos termopares que estavam nas placas, foram feitas algumas aquisições nas temperaturas de teste (40 °C e 85 °C) com as placas desligadas, verificando assim a diferença de temperatura medida entre os termopares e também entre termopar e temperatura ambiente.

Figura 4.18 - Temperaturas ambiente no setup de teste



Fonte: O autor (2019).

Com este teste foi verificado que a máxima diferença de temperatura entre os termopares é de  $\pm 3$  °C.

#### 4.1.2.2 Proteção por Hardware

Foi confeccionada uma placa de comunicação com o datalogger para proteção por sobre temperatura, para que se no caso de o software ou computador viesse a travar no momento em que algum grupo estivesse ligado, essa placa desliga a alimentação do teste protegendo assim os inversores por falha de estrutura. Um inversor de cada grupo foi monitorado no componente D101, são eles: 06, 26, 36 e 56.

##### 4.1.2.2.1.1 Teste de proteção de sobre temperatura

Simulando a temperatura acima do permitido (aquecendo o termopar manualmente), para verificar a proteção.

#### 4.1.2.2.1.2 Resultado do teste de proteção de sobre temperatura

Foram testados os pontos das placas monitoradas em cada grupo. A do temopar foi elevada até o momento em que a temperatura do ponto monitorado atingiu o valor máximo e o alarme do *datalogger* foi acionado (acionando o desligamento via hardware), desligando a alimentação do teste. No software, a célula correspondente ao ponto monitorado (Figura 4.13) foi preenchida em vermelho indicando o ponto com problema de sobre temperatura.

#### 4.1.2.2.2 Falta de energia elétrica durante o teste

Feita uma simulação de queda de energia no painel de alimentação do teste.

##### 4.1.2.2.2.1 Teste de falta de energia

Com o software rodando normalmente foi simulado uma queda de energia no painel de alimentação do teste, para certificar que o software continuasse funcionando normalmente.

##### 4.1.2.2.2.2 Resultado do teste de falta de energia

O software continuou funcionando normalmente realizando as aquisições e controle do teste.

##### 4.1.2.2.3 Proteção de inversor/compressor ligado acima de 15 min.

Realizado uma simulação deixando um inversor ligado, rodando um compressor por um tempo acima de 15 min. que é o tempo estabelecido pelo software para cada grupo.

#### 4.1.2.2.3.1 Teste de proteção de inversor ligado acima de 15 min.

Manter um compressor ligado acima de 15 minutos (tempo máximo de ciclo ON) para verificar se o software irá proteger e desligar a alimentação do teste.

#### 4.1.2.2.3.2 Resultado

Após o fim do tempo de 15 min. do grupo, o software identificou que um compressor estava ligado no momento de seu ciclo *OFF* e desligou a alimentação do teste, não deixando o compressor ligado durante um tempo acima do permitido. O software também salvou em um arquivo de falhas o momento da falha e o estado dos compressores.

#### 4.1.2.2.4 Proteção de inversor/compressor ligado fora de seu ciclo

Simulado o momento em que um inversor, liga seu respectivo compressor fora de seu grupo ligado.

#### 4.1.2.2.4.1 Teste de proteção de inversor/compressor ligado fora de seu ciclo

Enviar um comando para o inversor ligar seu respectivo compressor que não está em seu ciclo de funcionamento e verificar se o software desligará a alimentação do ensaio, protegendo esse inversor e salvará no arquivo de falhas o momento e o estado dos compressores.

#### 4.1.2.2.4.2 Resultado do teste de inversor/compressor ligado fora de seu ciclo

Foi ligado o grupo A (via software) e logo após foi ligado também (manualmente) um compressor do grupo 2 e no momento em que o software fez a

aquisição de corrente dos compressores, o mesmo verificou que um compressor de outro grupo estava ligado em momento errado, o software desligou a alimentação do teste e salvou no arquivo de falhas o estado dos compressores. O mesmo teste foi feito para os outros grupos, e o resultado foi satisfatório em todos os testes.

#### 4.1.2.2.5 Proteção de grupo ligado fora do ciclo

Mesma simulação do teste anterior, porém, agora ligando um grupo inteiro fora de seu ciclo.

##### 4.1.2.2.5.1 Teste proteção de grupo ligado fora do ciclo

Durante o funcionamento normal do grupo 1, foi ligado manualmente o grupo D.

##### 4.1.2.2.5.2 Resultado do teste de grupo ligado fora do ciclo

O software fez a aquisição de corrente dos compressores e identificou que um grupo estava ligado fora do ciclo que o software acionou. A alimentação do teste foi imediatamente desligada e foi salvo no arquivo de falhas o momento e o estado dos compressores.

O mesmo teste foi realizado com todos os grupos e o resultado foi satisfatório em todos os testes.

#### 4.1.2.2.6 Proteção por sobre temperatura na câmara

Essa proteção foi implementada porque a câmara no dia já teve histórico de perda de controle de temperatura em teste anterior, aparentemente sem motivo claro da falha.

##### 4.1.2.2.6.1 Teste de proteção por sobre temperatura na câmara

Um termopar foi colocado dentro da câmara e o software estava monitorando a temperatura ambiente interna da câmara, se caso a temperatura ambiente de teste ultrapassasse os 90°C o software desliga a alimentação da câmara climática e a alimentação do teste para que a temperatura ambiente não ultrapasse o máximo permitido e danifique os inversores que estão em teste.

##### 4.1.2.2.6.2 Resultado do teste de proteção por sobre temperatura na câmara

Com o software rodando normalmente foi simulado uma sobre temperatura ambiente aquecendo o termopar que monitora manualmente. O software imediatamente desligou a alimentação da câmara e dos inversores e salvou no arquivo de falhas o momento e o valor temperatura que causou a falha.

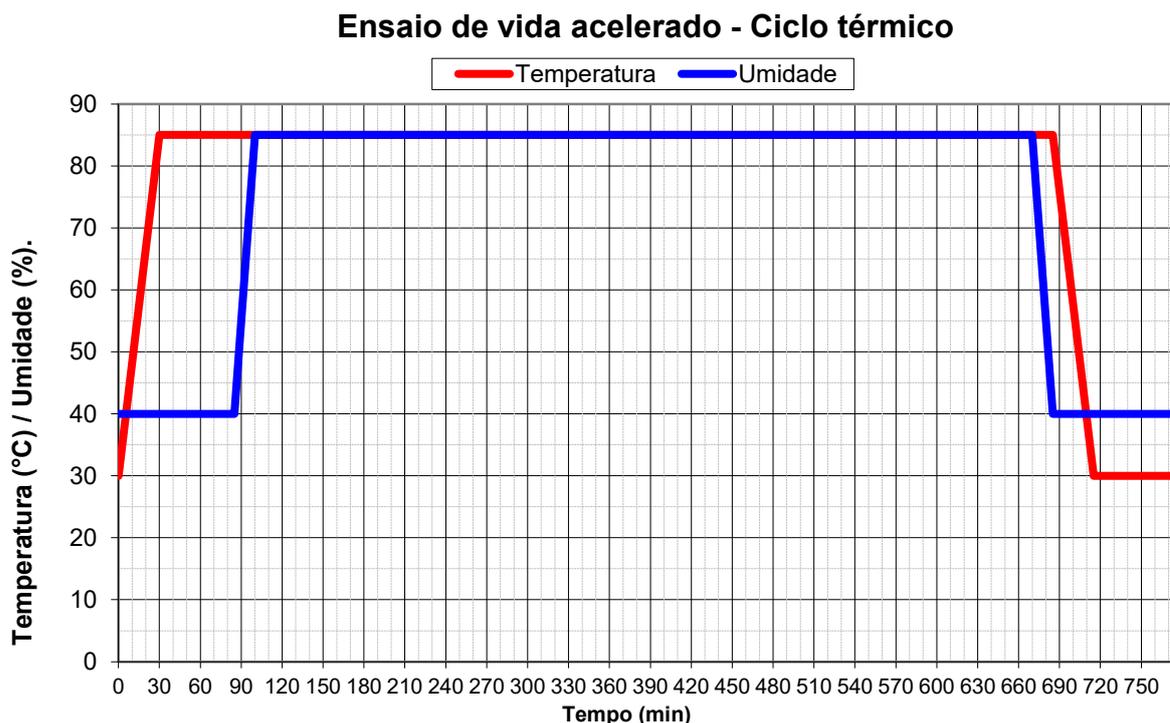
#### 4.1.2.3 Resultado geral dos testes de proteção da estrutura

Após todos os testes simulando as possíveis falhas que poderiam ocorrer com a estrutura de teste e as proteções criadas, evidenciou-se que a estrutura está adequada para rodar os ensaios de vida acelerado com os inversores de frequência.

## 4.2 SETUP DO TESTE

Segue abaixo, as condições climáticas do teste, bem como seu ciclo de funcionamento.

Figura 4.19 - Ciclo térmico da temperatura e umidade do teste



Fonte: Fabricante de refrigeradores, nome confidencial (2006).

A Tabela 4.1 apresenta o detalhadamente os ciclos térmicos.

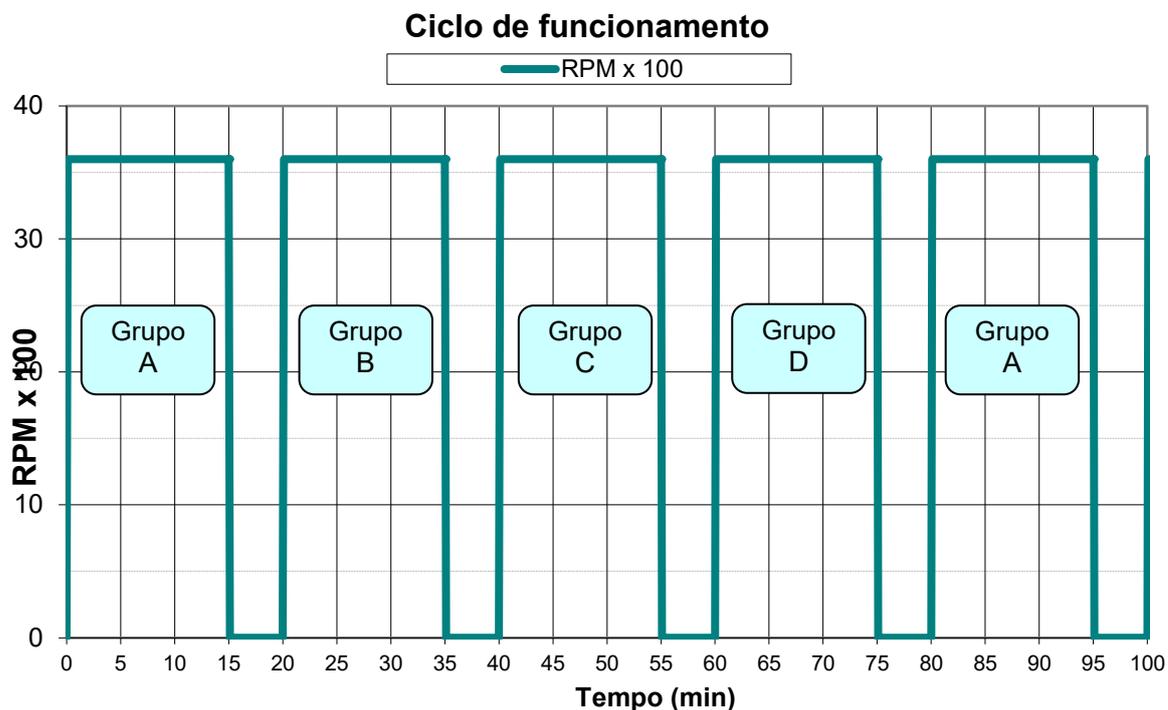
Tabela 4.1 - Ciclo térmico da câmara

Temperatura (°C)	30 - 85	85 - 85	85 - 85	85 - 85	85 - 85	85 - 85	30 - 30
Umidade (%)	40 - 40	40 - 40	40 - 40	85 - 85	85 - 85	40 - 40	40 - 40
Tempo (min.)	30	55	15	570	15	30	60

Fonte: O autor (2019).

O ciclo de funcionamento dos inversores (em grupos) é mostrado na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Ciclo de funcionamento dos 4 grupos



Fonte: O autor (2019).

A Tabela 4.2 apresenta de forma mais clara, como os inversores foram disponibilizados e divididos nos 4 grupos criados.

Tabela 4.2 - Disponibilização dos inversores nos grupos

	Inversores		Inversores		Inversores		Inversores
<b>Grupo A</b>	1	<b>Grupo B</b>	16	<b>Grupo C</b>	31	<b>Grupo D</b>	46
	2		17		32		47
	3		18		33		48
	4		19		34		49
	5		20		35		50
	6		21		36		51
	7		22		37		52
	8		23		38		53
	9		24		39		54
	10		25		40		55
	11		26		41		56
	12		27		42		57
	13		28		43		58
	14		29		44		59
	15		30		45		60

Fonte: O autor (2019).

### 4.3 CÁLCULO DO FATOR DE ACELERAÇÃO DO ENSAIO

Antes que o ensaio se inicie, além do setup de teste, é primordial o planejamento do tempo de teste, considerando as condições e o tempo desejado que o produto trabalhe em campo, um ensaio bem planejado, evita retrabalhos, gastos excessivos com recursos (que são sempre escassos e caros) ou com amostras.

O cálculo do fator de aceleração é um importante dado a ser conhecido antes do início do teste. O cálculo dos fatores de aceleração de cada condição do ensaio é mostrado nos capítulos a seguir.

#### 4.3.1 Fator de aceleração da temperatura

Como o teste possui dois fatores de estresse (temperatura e umidade), é importante calcular qual o fator de aceleração de cada um, para que se tenha um planejamento claro do tempo de teste a ser considerado.

É importante salientar, que o teste deve ser planejado e delineado para que o mesmo submeta o produto a condições severas de temperatura e umidade e que essas condições, representem ao final do teste, 10 anos de vida do produto em campo, ou seja, o fator de aceleração aqui calculado, será usado para delinear o tempo de teste para 10 anos de vida.

Primeiramente, para que seja possível calcular o fator de aceleração da temperatura, deve-se conhecer as condições do produto em campo. Com os dados coletados de clientes (fabricantes de refrigeradores), as condições em que os inversores são submetidos em campo são mostradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Condições de operação do inversor em campo

Condição	Pull Down (43 °C)	Pull Down (38 °C)	Pull Down (32 °C)	DEFROST (43 °C)	DEFROST (38 °C)
Temperatura de uso ( $T_{uso}$ ) (°C)	$T_{1uso} = 75$	$T_{1uso} = 65$	$T_{3uso} = 55$	$T_{4uso} = 60$	$T_{5uso} = 55$
Tempo de uso ( $Tempo_{uso}$ ) (horas)	$Tempo_{1uso} = 8$	$Tempo_{2uso} = 28$	$Tempo_{3uso} = 48$	$Tempo_{4uso} = 180$	$Tempo_{5uso} = 405$
Umidade Relativa	40%				

Fonte: Fabricante de refrigeradores, nome confidencial (2006).

A Tabela 4.4 é a continuação das condições da Tabela 4.3.

Tabela 4.4 - Condições de operação do inversor em campo

Condição	DEFROST (32 °C)	Normal (43 °C)	Normal (38 °C)	Normal (32 °C)	STAND BY
Temperatura de uso ( $T_{uso}$ ) (°C)	$T_{6uso} = 45$	$T_{7uso} = 60$	$T_{8uso} = 55$	$T_{9uso} = 45$	$T_{10uso} = 35$
Tempo de uso ( $Tempo_{uso}$ ) (horas)	$Tempo_{6uso} = 735$	$Tempo_{7uso} = 472$	$Tempo_{8uso} = 1194$	$Tempo_{9uso} = 2365$	$Tempo_{10uso} = 2325,35$
Umidade Relativa	40%				

Fonte: Fabricante de refrigeradores, nome confidencial (2006).

Com as condições do produto em campo, utilizando a equação 3.3.1.3, é possível fazer os cálculos de cada um dos fatores de aceleração considerando cada condição de temperatura no campo as condições de temperatura da câmara.

Sendo assim, o cálculo do fator de aceleração é composto conforme segue:

4.3.1.1 Fator de aceleração para  $T_{1uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_1 = \exp \left[ \frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad 4.3.1.1$$

$$AF85_1 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{T_{1uso} + 273,15} - \frac{1}{T_{85} + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.2$$

$$AF85_1 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{75 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.3$$

$$AF85_1 = 1,918$$

4.3.1.2 Fator de aceleração para  $T_{2uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_2 = \exp \left[ \frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad 4.3.1.4$$

$$AF85_2 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{T_{2uso} + 273,15} - \frac{1}{T_{85} + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.5$$

$$AF85_2 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{65 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.6$$

$$AF85_2 = 3,825$$

4.3.1.3 Fator de aceleração para  $T_{3uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_3 = \exp \left[ \frac{E_a}{k_b} \cdot \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right] \quad 4.3.1.7$$

$$AF85_3 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{T_{3uso} + 273,15} - \frac{1}{T_{85} + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.8$$

$$AF85_3 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.9$$

$$AF85_3 = 7,953$$

4.3.1.4 Fator de aceleração para  $T_{4uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_4 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.10$$

$$AF85_4 = 5,485$$

4.3.1.5 Fator de aceleração para  $T_{5uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_5 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.11$$

$$AF85_5 = 7,953$$

4.3.1.6 Fator de aceleração para  $T_{6uso}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_6 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45 + 273,15} - \frac{1}{85 + 273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.12$$

$$AF85_6 = 17,316$$

4.3.1.7 Fator de aceleração para  $T_{7\text{uso}}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_7 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60+273,15} - \frac{1}{85+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.13$$

$$AF85_7 = 5,485$$

4.3.1.8 Fator de aceleração para  $T_{8\text{uso}}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_8 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{85+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.14$$

$$AF85_8 = 7,953$$

4.3.1.9 Fator de aceleração para  $T_{9\text{uso}}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_9 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45+273,15} - \frac{1}{85+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.15$$

$$AF85_9 = 17,316$$

4.3.1.10 Fator de aceleração para  $T_{10\text{uso}}$  e 85 °C de câmara:

$$AF85_{10} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{35+273,15} - \frac{1}{85+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.16$$

$$AF85_{10} = 39,654.$$

#### 4.3.1.11 Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 85 °C

Para o cálculo do fator de aceleração total da temperatura quando a condição de temperatura da câmara está em 85 °C, temos que considerar também o tempo em que cada condição de campo o inversor é submetido e uma média ponderada de cada um desse tempo com a sua condição, considerando o tempo total em 1 ano. Com isso, temos:

$$AF85_{total} = \frac{8760}{\left[\left(\frac{Tempo_{1uso}}{AF85_1}\right) + \left(\frac{Tempo_{2uso}}{AF85_2}\right) + \dots + \left(\frac{Tempo_{9uso}}{AF85_9}\right) + \left(\frac{Tempo_{10uso}}{AF85_{10}}\right)\right]} \quad 4.3.1.17$$

Com isso, temos:

$$AF85_{total} = 14,592$$

Ponderando o fator de aceleração temos:

$$AF85_{ponderado} = \frac{\text{Tempo de teste em 85 °C}}{\text{Tempo total do ciclo térmico}} \quad 4.3.1.18$$

$$AF85_{ponderado} = \left(\frac{10,917}{12,917}\right) \cdot AF85_{total} \quad 4.3.1.19$$

$$AF85_{ponderado} = 12,332$$

Então,  $AF85_{ponderado}$  é o fator de aceleração do teste, quando a câmara encontra-se na temperatura de 85 °C considerando todas as temperaturas de aplicação do produto em campo durante 1 ano.

Acontece que como se pode perceber na Figura 4.19, a temperatura da câmara não é constante em 85 °C, ela, em alguns momentos, é mudada para 30 °C durante um certo período. Essa mudança, basicamente é feita para que seja possível, submeter o inversor a uma ciclagem térmica com o intuito de se tentar fadigar os componentes eletrônicos devido a ciclos térmicos. Então, é possível

concluir que outros fatores de aceleração devem ser calculados para as diferentes temperaturas de câmara, o que é feito a seguir.

#### 4.3.1.12 Fator de aceleração para $T_{1uso}$ e 57,5 °C de câmara:

Como ficaria muito maçante calcular os fatores de aceleração do teste no momento da rampa de descida e subida de temperatura do ciclo térmico e como o tempo da rampa é curto, os resultados dos cálculos de fatores de aceleração para cada grau, considerando o tempo de cada um, os mesmos teriam pouca influência no cálculo total, então, para simplificar, considerou-se a temperatura média da rampa (57,5 °C), para o cálculo do fator de aceleração.

$$AF_{57,5_1} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{75+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.20$$

$$AF_{57,5_1} = 0,291.$$

#### 4.3.1.13 Fator de aceleração para $T_{2uso}$ e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_2} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{65+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.21$$

$$AF_{57,5_2} = 0,291.$$

#### 4.3.1.14 Fator de aceleração para $T_{3uso}$ e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_3} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.22$$

$$AF_{57,5_3} = 1,206.$$

4.3.1.15 Fator de aceleração para  $T_{4uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_4} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.23$$

$$AF_{57,5_4} = 0,832.$$

4.3.1.16 Fator de aceleração para  $T_{5uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_5} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.24$$

$$AF_{57,5_5} = 1,206.$$

4.3.1.17 Fator de aceleração para  $T_{6uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_6} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.25$$

$$AF_{57,5_6} = 2,625.$$

4.3.1.18 Fator de aceleração para  $T_{7uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_7} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.26$$

$$AF_{57,5_7} = 0,832.$$

4.3.1.19 Fator de aceleração para  $T_{8uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_8} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.27$$

$$AF_{57,5_8} = 1,206.$$

4.3.1.20 Fator de aceleração para  $T_{9uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_9} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.28$$

$$AF_{57,5_9} = 2,625.$$

4.3.1.21 Fator de aceleração para  $T_{10uso}$  e 57,5 °C de câmara:

$$AF_{57,5_{10}} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{35+273,15} - \frac{1}{57,5+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.29$$

$$AF_{57,5_{10}} = 6,012.$$

4.3.1.22 Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 57,5 °C

Assim como apresentado em 4.3.1.11, aqui também se faz necessário ponderar o fator de aceleração do ensaio quando a temperatura da câmara estiver na transição, pois, como o tempo dessa transição é curto, o fator de aceleração do teste deve ser ponderado com o peso correto.

$$AF_{57,5_{total}} = \frac{8760}{\left[ \left( \frac{Tempo_{1uso}}{AF_{85_1}} \right) + \left( \frac{Tempo_{2uso}}{AF_{85_2}} \right) + \dots + \left( \frac{Tempo_{9uso}}{AF_{57,5_9}} \right) + \left( \frac{Tempo_{10uso}}{AF_{57,5_{10}}} \right) \right]} \quad 4.3.1.30$$

Com isso, temos:

$$AF_{57,5_{total}} = 2,212$$

Ponderando o fator de aceleração temos:

$$AF_{57,5_{ponderado}} = \frac{\text{Tempo de teste em } 57,5 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Tempo total do ciclo térmico}} \quad 4.3.1.31$$

$$AF_{57,5_{ponderado}} = \left( \frac{1}{12,917} \right) \cdot AF_{57,5_{total}} \quad 4.3.1.32$$

$$AF_{57,5_{ponderado}} = 0,171$$

4.3.1.23 Fator de aceleração para  $T_{1\text{uso}}$  e  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  de câmara:

Agora, da mesma maneira realizada para as temperaturas de teste de  $85 \text{ } ^\circ\text{C}$  e transição da rampa de temperatura ( $57,5 \text{ } ^\circ\text{C}$  neste caso) deve-se calcular o fator de aceleração para cada condição em campo considerando a temperatura de câmara de  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ , conforme mostrado na Figura 4.19.

$$AF_{30_1} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{75+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.33$$

$$AF_{30_1} = 0,031.$$

4.3.1.24 Fator de aceleração para  $T_{2\text{uso}}$  e  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  de câmara:

$$AF_{30_2} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{65+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.34$$

$$AF_{30_2} = 0,062.$$

4.3.1.25 Fator de aceleração para  $T_{3uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_3 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.35$$

$$AF30_3 = 0,013.$$

4.3.1.26 Fator de aceleração para  $T_{4uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_4 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.36$$

$$AF30_4 = 0,09.$$

4.3.1.27 Fator de aceleração para  $T_{5uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_5 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.37$$

$$AF30_5 = 0,13.$$

4.3.1.28 Fator de aceleração para  $T_{6uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_6 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.38$$

$$AF30_6 = 0,283.$$

4.3.1.29 Fator de aceleração para  $T_{7uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_7 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{60+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.39$$

$$AF30_7 = 0,09.$$

4.3.1.30 Fator de aceleração para  $T_{8uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_8 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{55+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.40$$

$$AF30_8 = 0,13.$$

4.3.1.31 Fator de aceleração para  $T_{9uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_9 = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{45+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.41$$

$$AF30_9 = 0,283.$$

4.3.1.32 Fator de aceleração para  $T_{10uso}$  e 30 °C de câmara:

$$AF30_{10} = \exp \left[ \frac{0,7}{8,6173 \cdot 10^{-5}} \cdot \left( \frac{1}{35+273,15} - \frac{1}{30+273,15} \right) \right] \quad 4.3.1.42$$

$$AF30_{10} = 0,647.$$

4.3.1.33 Fator de aceleração total para ensaio de câmara em 30 °C

Assim como apresentado em 4.3.1.11, aqui também se faz necessário ponderar o fator de aceleração do ensaio quando a temperatura da câmara estiver na transição, pois, como o tempo dessa transição é curto, o fator de aceleração do teste deve ser ponderado com o peso correto.

$$AF30_{total} = \frac{8760}{\left[ \left( \frac{Tempo_{1uso}}{AF30_1} \right) + \left( \frac{Tempo_{2uso}}{AF30_2} \right) + \dots + \left( \frac{Tempo_{9uso}}{AF30_9} \right) + \left( \frac{Tempo_{10uso}}{AF30_{10}} \right) \right]} \quad 4.3.1.43$$

Com isso, temos:

$$AF30_{total} = 0,2382$$

Ponderando o fator de aceleração temos:

$$AF30_{ponderado} = \frac{\text{Tempo de teste em } 30\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{Tempo total do ciclo térmico}} \quad 4.3.1.44$$

$$AF30_{ponderado} = \left(\frac{1}{12,917}\right) \cdot AF30_{total} \quad 4.3.1.45$$

$$AF30_{ponderado} = 0,018$$

#### 4.3.1.34 Fator de aceleração total da temperatura

Considerando todos os fatores de aceleração nas diferentes condições de temperaturas de aplicação do produto e teste, o fator de aceleração do teste considerando a temperatura é dado a seguir:

$$AFT = AF30_{ponderado} + AF57,5_{ponderado} + AF85_{ponderado}$$

$$AFT = 12,522$$

#### 4.3.2 Fator de aceleração da umidade

Para o cálculo de fator de aceleração da umidade, a equação 3.3.3.1 considerando apenas a primeira parcela referente a umidade deve ser usada.

O modelo de Eyring sendo aplicada para o cálculo do fator de aceleração da umidade segue abaixo:

$$AFU = \left(\frac{RH_t}{RH_u}\right)^m \quad 4.3.2.1$$

Onde:

AFU = Fator de aceleração da umidade;

RH<sub>t</sub> = Umidade relativa em teste;

RH<sub>u</sub> = Umidade relativa em campo;

m = Constante de potência da umidade, aqui sendo 2,66 de acordo com Hallberg and Peck (1991).

Assim como feito para a temperatura, o fator de aceleração da umidade deve ser calculado considerando também a condição de aplicação do produto em campo frente a condição de umidade do teste.

#### 4.3.2.1 Fator de aceleração para RH<sub>u</sub> (40%) e RH<sub>t1</sub>

Conforme Tabela 4.3 - Condições de operação do inversor em campo e Tabela 4.4 - Condições de operação do inversor em campo, a umidade média de aplicação do produto em campo é de 40%, então o fator de aceleração da umidade pode ser calculado conforme segue:

$$AFU = \left( \frac{RH_t}{RH_u} \right)^m \quad 4.3.2.2$$

$$AFU_1 = \left( \frac{85\%}{40\%} \right)^{2,66} \quad 4.3.2.3$$

$$AFU_1 = 7,426$$

Ponderando o fator de aceleração devido ao tempo na condição temos:

$$AFU_{ponderado85} = \left( \frac{85}{\text{Tempo total do ciclo térmico}} \right) \cdot AFU_1 \quad 4.3.2.4$$

$$AFU_{ponderado85} = 5,462$$

#### 4.3.2.2 Fator de aceleração para RH<sub>u</sub> (40%) e RH<sub>t2</sub> (62%)

Da mesma forma feita com o cálculo do fator de aceleração da temperatura no momento da rampa de subida/descida da temperatura, aqui também assumiu-se a umidade média de umidade durante o tempo de rampa do ciclo térmico.

$$AFU_2 = \left(\frac{62\%}{40\%}\right)^{2,66} \quad 4.3.2.5$$

$$AFU_2 = 3,208$$

Ponderando o fator de aceleração devido ao tempo na condição temos:

$$AFU_{ponderado62} = \left(\frac{62}{\text{Tempo tota do ciclo térmico}}\right) \cdot AFU_2 \quad 4.3.2.6$$

$$AFU_{ponderado62} = 0,124$$

#### 4.3.2.3 Fator de aceleração para RH<sub>u</sub> (40%) e RH<sub>t3</sub> (40%)

$$AFU_3 = \left(\frac{40\%}{40\%}\right)^{2,66} \quad 4.3.2.7$$

$$AFU_3 = 1$$

Ponderando o fator de aceleração devido ao tempo na condição temos:

$$AFU_{ponderado40} = \left(\frac{40}{\text{Tempo total do ciclo térmico}}\right) \cdot AFU_3 \quad 4.3.2.8$$

$$AFU_{ponderado40} = 0,226$$

#### 4.3.2.4 Fator de aceleração total da umidade

Para considerar o fator de aceleração total da umidade, basicamente temos:

$$AFTU = AFU_{ponderado85} + AFU_{ponderado62} + AFU_{ponderado40} \quad 4.3.2.9$$

$$AFTU = 5,812$$

#### 4.3.3 Fator de aceleração total do ensaio

Agora, com todos os cálculos de fatores de aceleração considerando todas as condições de campo e as condições em teste, é possível então avaliar qual o fator de aceleração total do teste, conforme segue:

$$AFTH = AFT \times AFTU$$

$$AFTH = 12,522 \times 5,812$$

$$AFTH = 72,7778$$

Ou seja, para cada hora de teste, 72,7778 horas do produto em campo é simulada.

Para um teste onde se quer simular 10 anos (87600 h) de vida em campo, temos:

$$Tt = \frac{87600}{AFTH} = 1203,7 \text{ h} \quad 4.3.3.1$$

Então, temos que nas condições de testes apresentadas, **1203,7 h** em teste equivalem a **10 anos** de funcionamento do produto em campo.

#### 4.4 RESULTADOS DO ENSAIO

Primeiramente, por questões de confidencialidade, os dados de tempos até a falha aqui apresentados, foram multiplicados por uma constante “X”. Essa constante adicionada aos dados foi necessária para que a confidencialidade dos dados e as métricas de confiabilidade fossem mantidas em confidencialidade para que seja possível a apresentação desse trabalho, seguindo a política da empresa.

O ensaio de vida acelerado tem como objetivo simular 10 anos de vida do produto em campo.

Com isso, segue abaixo o resultado do ensaio de vida acelerado, realizado nas condições apresentadas de 4.1 a 4.3.3.

- **Duração programada de ensaio:** 1203 h (10 anos);
- **Real duração do ensaio:** 1791 h (14,9 anos)
- 

Durante o ensaio, 6 falhas foram registradas conforme segue no Quadro 1.

Quadro 4.1 - Falhas reportadas no teste

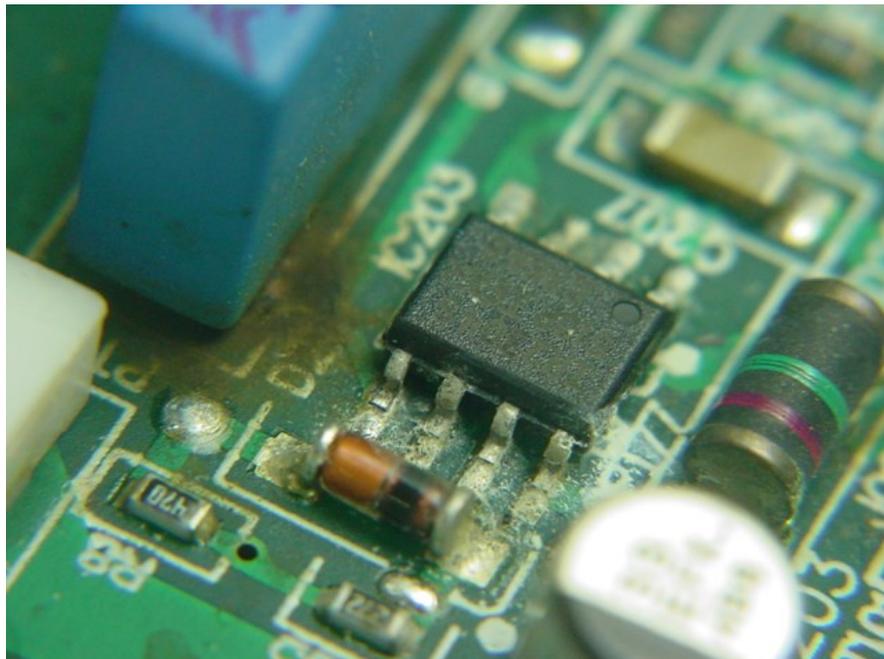
Inversor	Horas de teste (horas)	Tempo de vida calculado (Anos)	Problema reportado
59	118	0,98	Problemas com setup de teste
48	554	4,60	<i>Driver</i> IC201
19	1552	12,90	Ressonador
29	1552	12,90	Pino 19 do DSP
12	1743	14,50	<i>Driver</i> IC203
27	1743	14,50	<i>Driver</i> IC202

Fonte: O autor (2019).

A seguir, uma análise da falha de cada inversor:

- **Inversor:** 59
- **Horas sob teste:** 118 h;
- **Tempo de vida calculado:** 0,98 ano
- **Descrição do problema:** O teste iniciou com um ciclo térmico errado, diferente do apresentado na Figura 4.19, o erro foi causado por que o ciclo da umidade foi invertida com o da temperatura, causando condensação em pontos específicos da placa eletrônica. Essa falha, como não foi uma falha de produto, foi considerada uma suspensão no teste.

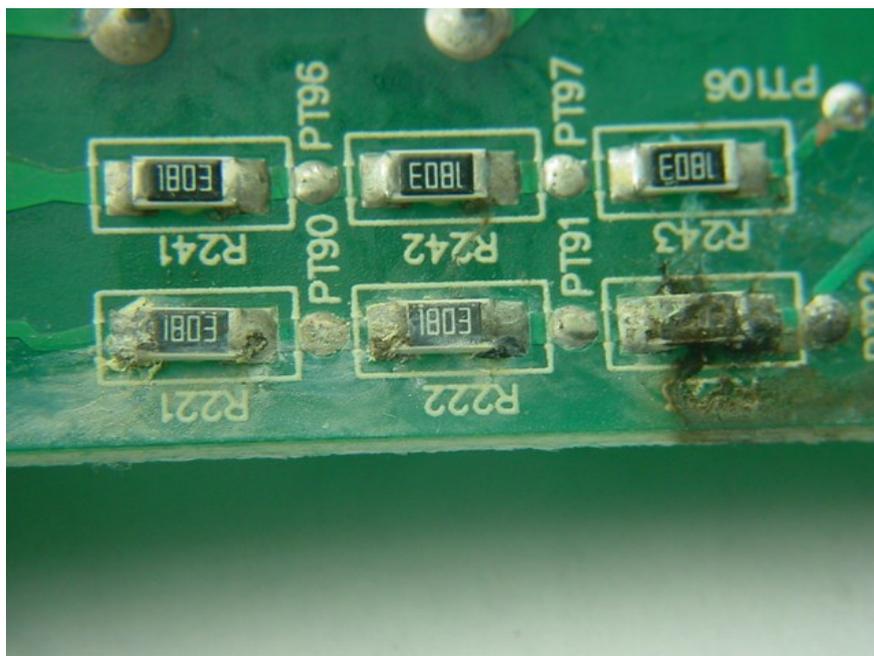
Figura 4.21- Condensação criada na PCB da placa 59



Fonte: O autor (2019).

Outro ponto de condensação na mesma placa foi evidenciado, conforme apresentado na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Condensação criada na PCB da placa 59

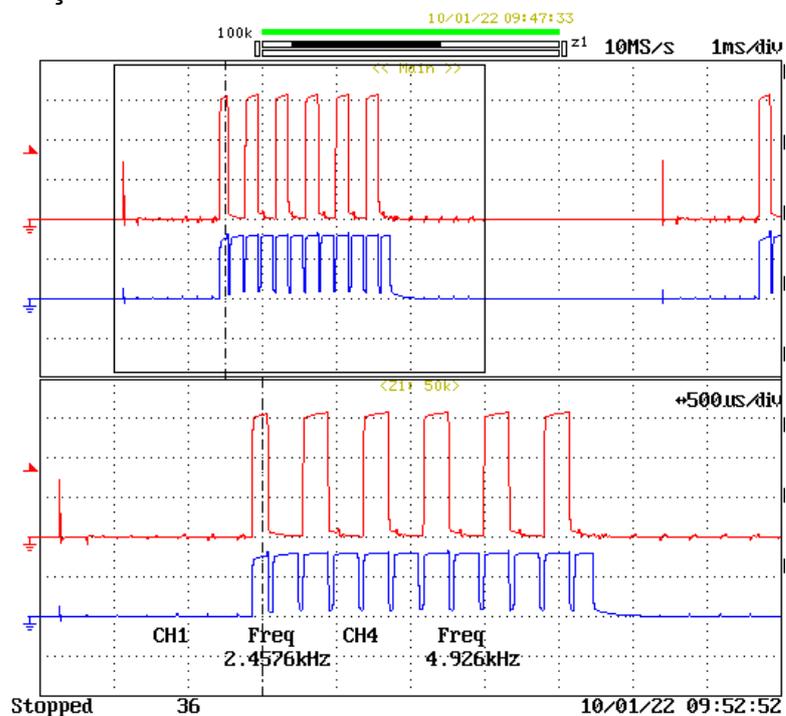


Fonte: O autor (2019).

- **Inversor:** 48
- **Horas sob teste:** 554 h;
- **Tempo de vida calculado:** 4,6 anos
- **Descrição do problema:** O *Driver* IC201 apresentou problemas de funcionamento. Esse componente foi enviado para o fornecedor realizar uma análise mais aprofundada e foi evidenciado que o componente apresentou corrosão em alguns contatos.
  
- **Inversor:** 19
- **Horas sob teste:** 1552 h;
- **Tempo de vida calculado:** 12,9 anos
- **Descrição do problema:** O ressonador do inversor (usado para o *clock* do processador) não estava mais gerando o sinal necessário.

- **Inversor: 29**
  - **Horas sob teste: 1552 h;**
  - **Tempo de vida calculado: 12,9 anos**
  - **Descrição do problema:** O pino 19 do processador (DSP) apresentou baixa impedância.
- 
- **Inversor: 12**
  - **Horas sob teste: 1743 h;**
  - **Tempo de vida calculado: 14,5 anos**
  - **Descrição do problema:** O Driver IC203 apresentou problemas de funcionamento. O sinal de chaveamento do PWM entre os pinos 6 e 7 era de apenas 2,5 kHz, ao invés dos 4,9 kHz normalmente. A Figura 4.23 apresenta a análise de sinais feita.

Figura 4.23 - Medição do sinal do PWM do Driver



Fonte: O autor (2019).

- **Inversor:** 27
- **Horas sob teste:** 1743 h;
- **Tempo de vida calculado:** 14,5 anos
- **Descrição do problema:** O mesmo problema ocorrido com a placa 12. O Driver IC202 também apresentou problemas de funcionamento e o mesmo comportamento na análise de sinais foi evidenciada.

O ensaio foi finalizado com 1791 h, das 60 amostras, 5 apresentaram falhas de funcionamento e 1 foi suspensa devido ao problema de estrutura do teste. Com essas falhas, seus tempos e considerando o tempo esperado de vida em campo com o fator de aceleração do teste, é possível agora conduzir uma análise de confiabilidade de produto, conforme segue no próximo capítulo.

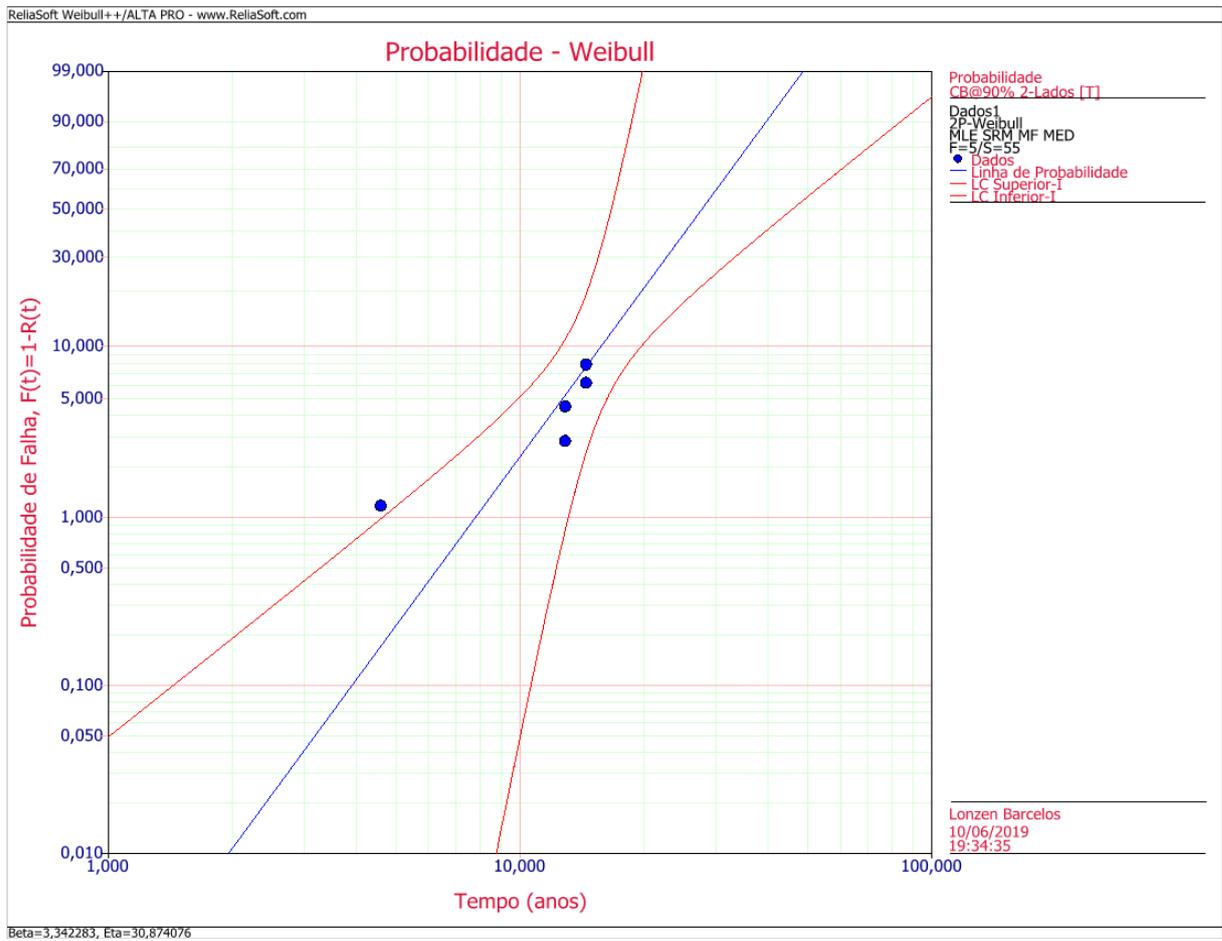
#### 4.5 ANÁLISES DE CONFIABILIDADE

Com os dados de tempos até a falha de cada amostra e o uso do software Weibull ++<sup>®</sup> é possível realizar uma análise de confiabilidade de produto.

A Figura 4.24 representa o gráfico de probabilidade Weibull para os dados de falha do teste.

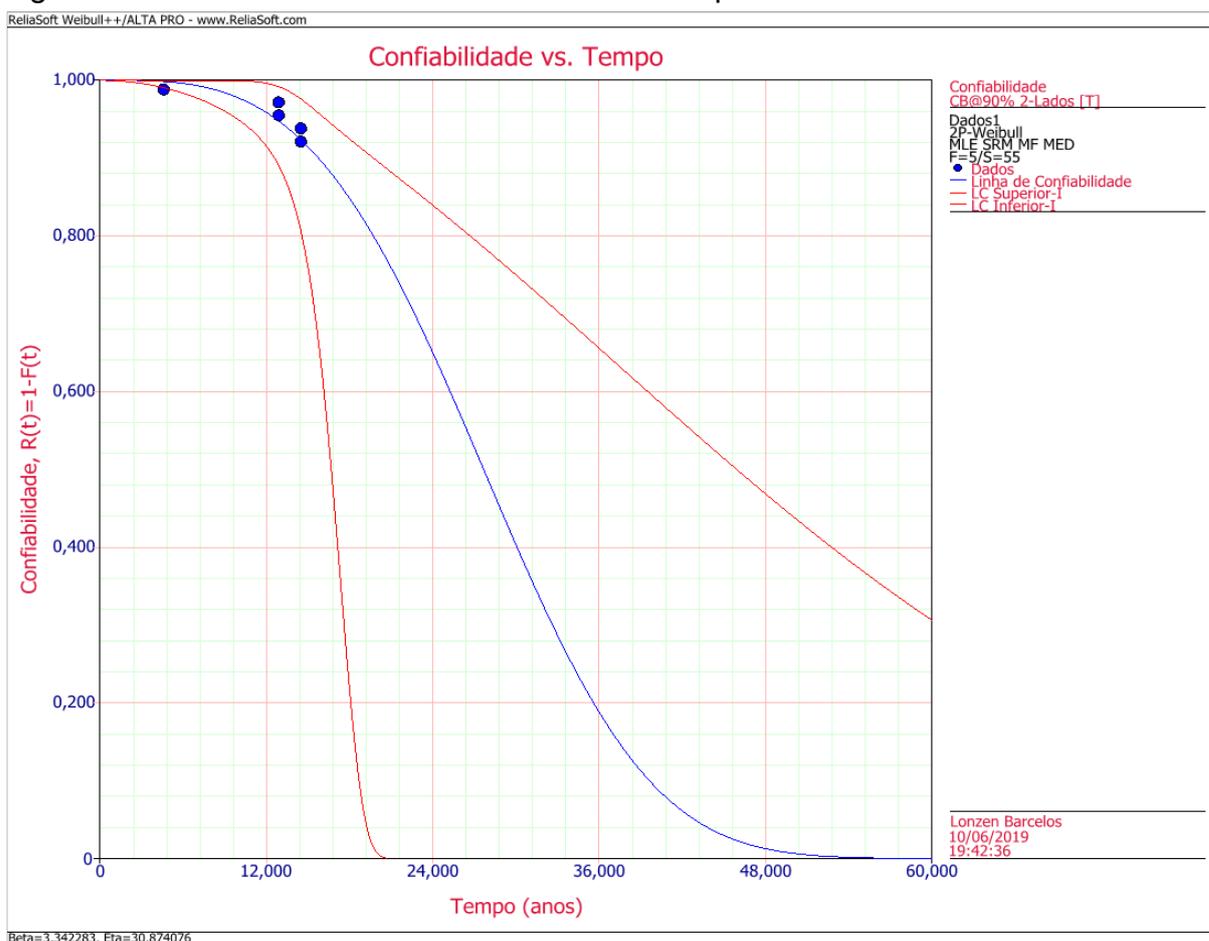
Verifica-se que com um intervalo de confiança de 90%, quase todos os dados se ajustam ao modelo.

Figura 4.24 - Gráfico de probabilidade Weibull



Fonte: O autor (2019).

Figura 4.25 - Gráfico de confiabilidade versus tempo

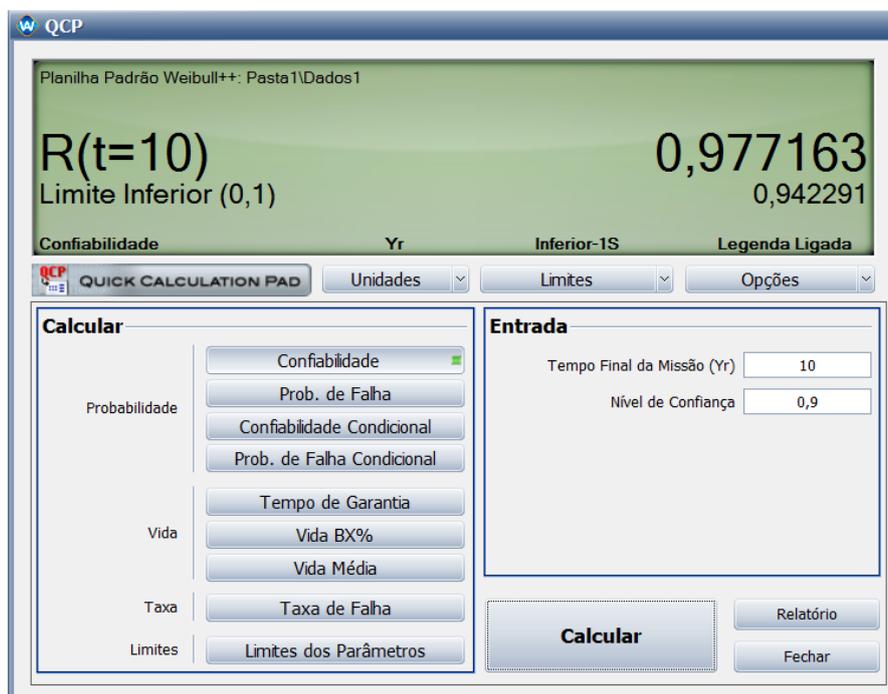


Fonte: O autor (2019).

O gráfico de confiabilidade mostra que para 10 anos de vida, temos aproximadamente em torno de 98% de confiabilidade, se considerarmos 90% de intervalo de confiança, no pior dos casos temos em torno de 94% de confiabilidade para 10 anos de vida.

Com a ajuda do software Weibull++<sup>®</sup> é possível obter esses dados de forma precisa.

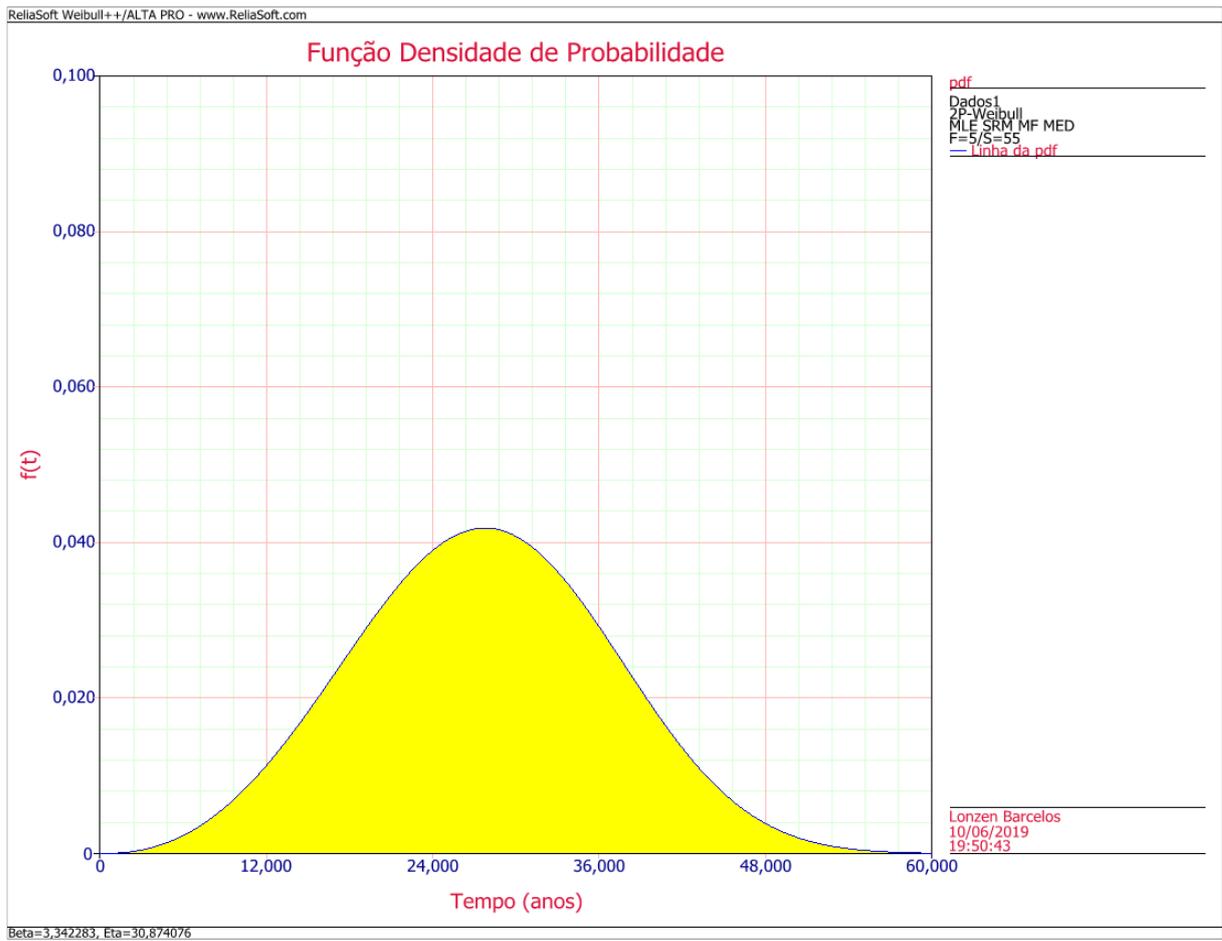
Figura 4.26 - Confiabilidade do produto para 10 anos



Fonte: O autor (2019).

Um outro gráfico importante é a curva da PDF, a qual é mostrada na Figura 4.27.

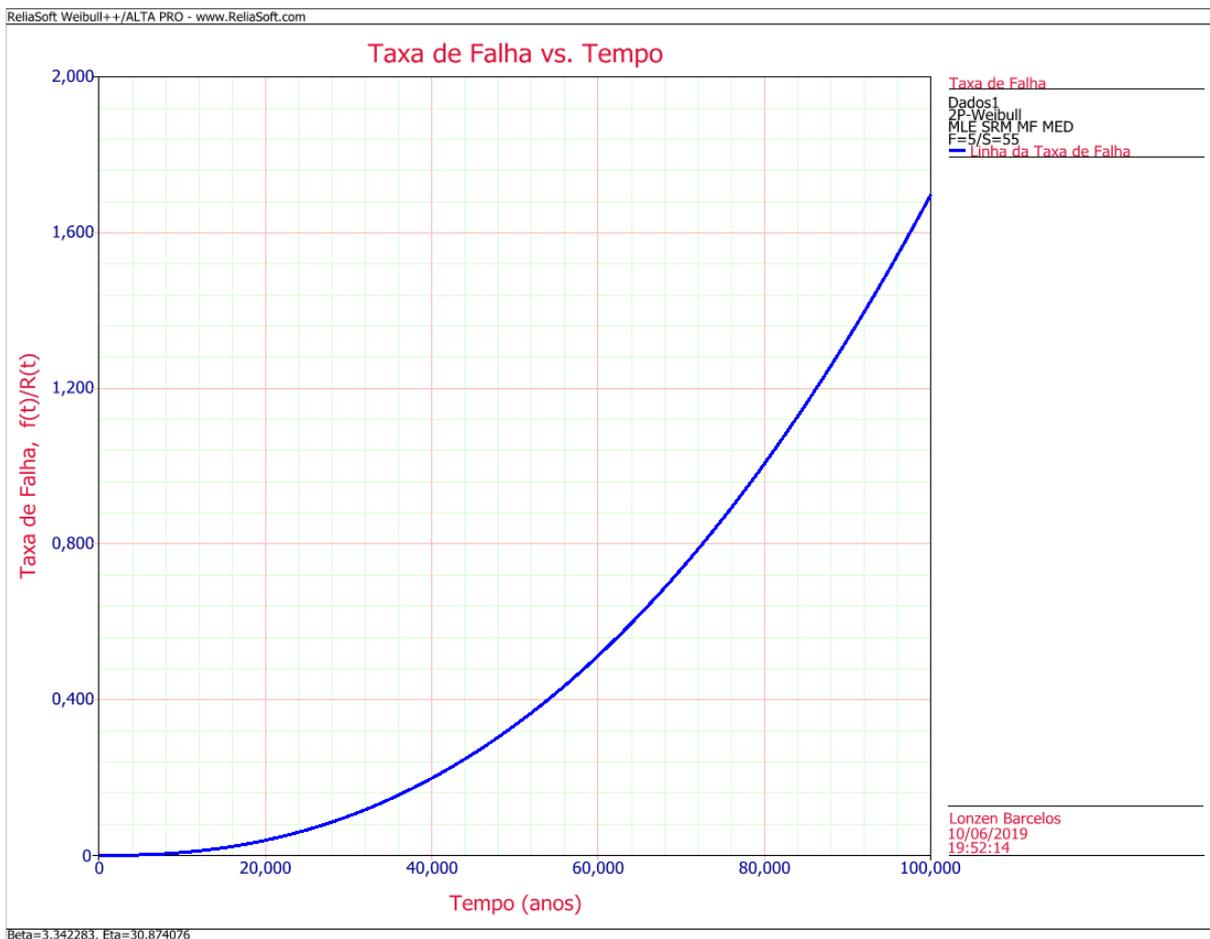
Figura 4.27 - Gráfico da pdf



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 4.28 é possível verificar a taxa de falha do produto ao longo do tempo.

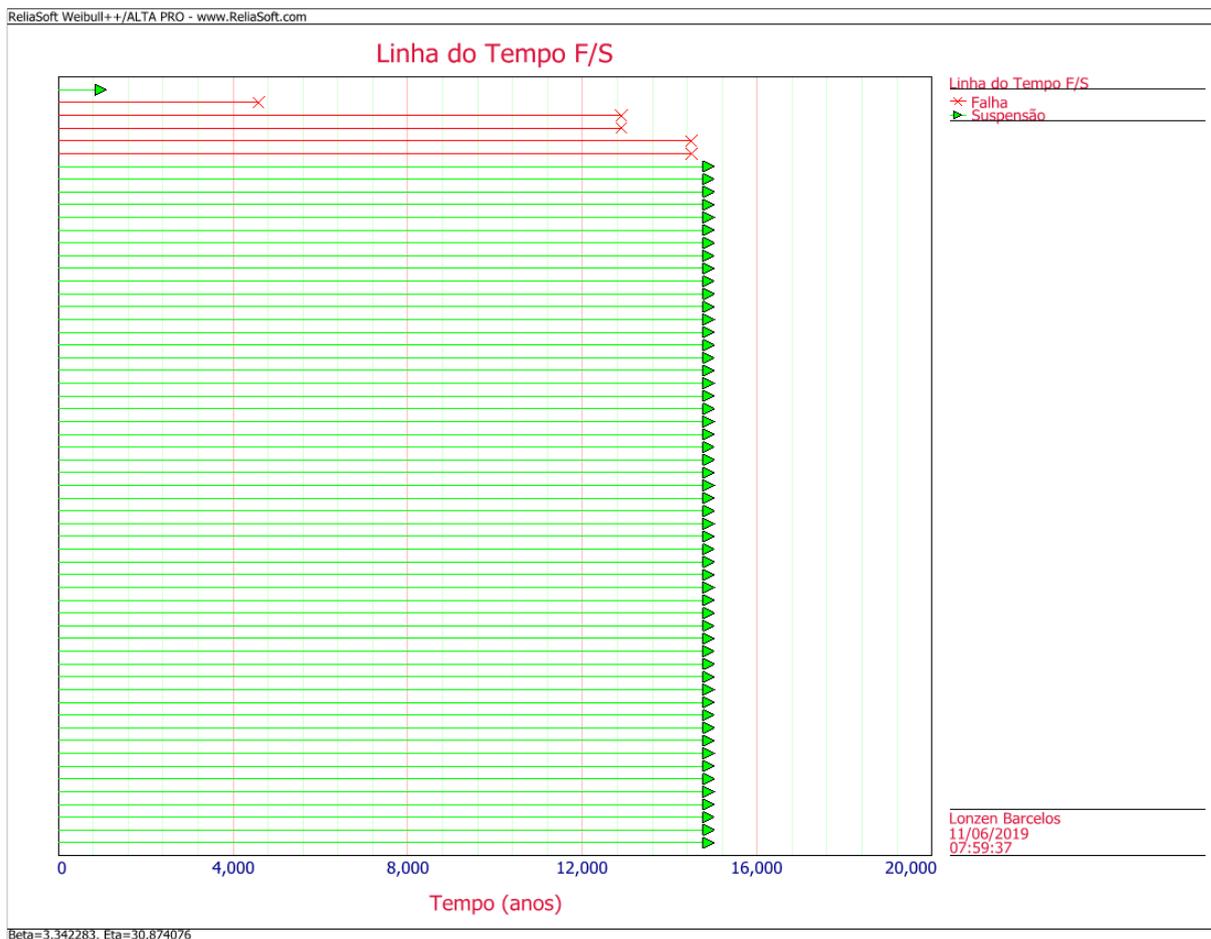
Figura 4.28 - Taxa de falha



Fonte: O autor (2019).

A Figura 4.29 mostra os dados censurados bem como os dados de falhas ao longo do ensaio.

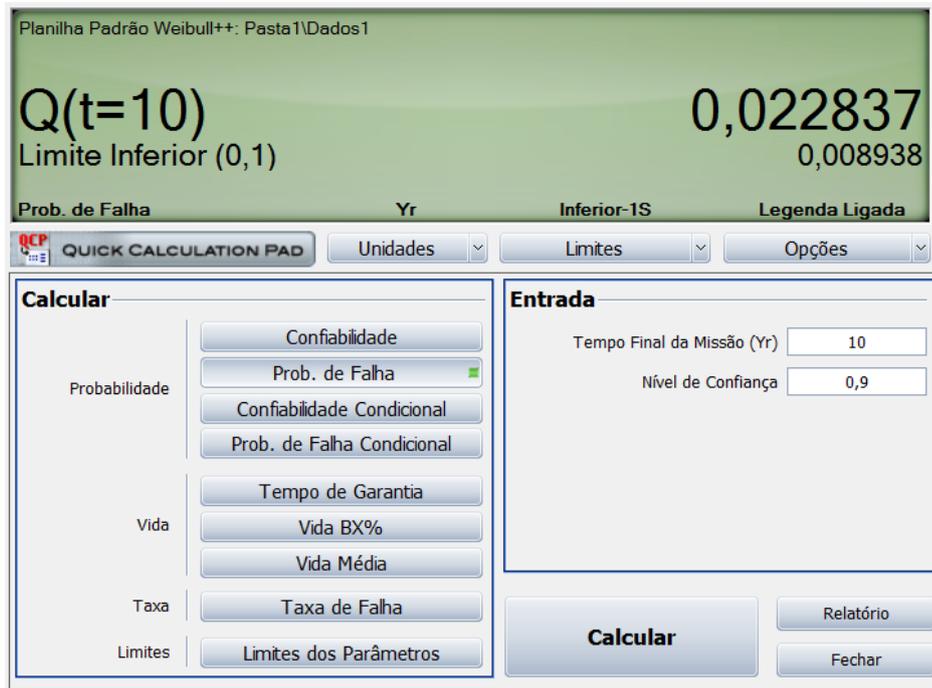
Figura 4.29 - Linha do tempo com as falhas e suspensões



Fonte: O autor (2019).

A probabilidade de falha para 10 anos é mostrada na Figura 4.30.

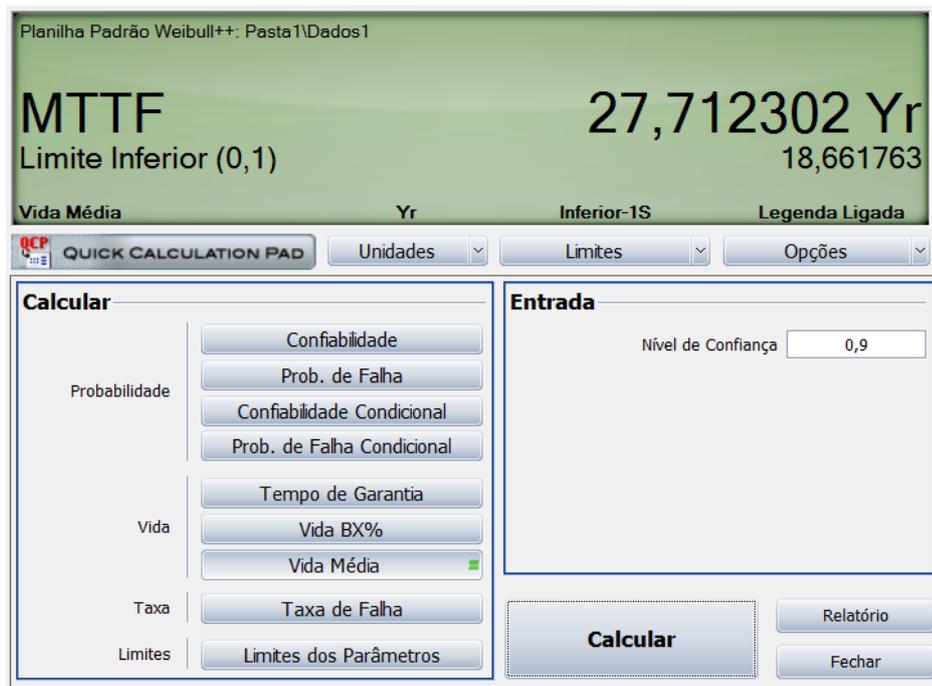
Figura 4.30 - Probabilidade de falha para 10 anos de vida



Fonte: O autor (2019).

O MTTF é de 27,7 anos, com um pior caso considerando 90% de intervalo de confiança de 18,7 anos.

Figura 4.31 - MTTF



Fonte: O autor (2019).

#### 4.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, todo o ensaio de confiabilidade como sua estrutura utilizada, equipamentos para controle e monitoramento, Software supervisor e proteções, análises das falhas de produto e estrutura, cálculos de fatores de aceleração e análises de confiabilidade foram explicados de forma a ser possível ter um claro entendimento de toda a estrutura necessária para que um ensaio de confiabilidade seja adequadamente estruturado, dando ao engenheiro de confiabilidade, a confiança na coleta dos dados.

O capítulo possui importantes informações, pois apresenta como um ensaio em controles eletrônicos podem ser conduzidos. Também, como um ensaio de confiabilidade deve ser delineado e todo o seu planejamento antes de efetivamente iniciar os ensaios.

Também, apresentou importantes análises de confiabilidades com os dados coletados, análises de falhas dos componentes durante o ensaio e apresentou os resultados do ensaio de forma a ser possível ter dados que podem facilmente serem utilizados em análises de decisões sobre a confiabilidade do produto.

O capítulo 5, apresenta a conclusão geral do trabalho, os resultados das análises as dificuldades encontradas com o trabalho bem como a proposta para os trabalhos futuros.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi abordado um estudo de confiabilidade em inversores de frequência utilizados em sistemas de refrigeração aplicando-se conhecimentos de engenharia de confiabilidade como a distribuição de vida Weibull para análise LDA, a relação vida VS stress de Arrhenius para o stress de temperatura, o modelo de Eyring modificado por Peck (1986) para o stress de umidade bem como a análise de falhas e conceitos de suspensões em um ensaio de vida acelerado.

A distribuição de Weibull foi elencada para as análises por ser a que apresentou uma melhor aderência aos dados. A relação vida vs stress de Arrhenius-Peck por sua vez, conforme literatura, foram utilizadas por serem largamente aplicadas a controles eletrônicos, como principais metodologias de cálculos de fatores de aceleração.

Com a distribuição de vida do produto e os fatores de aceleração do ensaio, uma análise de vida (LDA) com as métricas de confiabilidade como saída foi realizada, apresentando a confiabilidade, a probabilidade de falha, MTTF e outras métricas.

A apresentação de uma metodologia muito usada na indústria foi também abordada aqui. Utilizando-se de alguns dados já disponibilizados pela literatura, na intenção de se ter um delineamento de ensaio com os menores custos em termos de quantidade de testes e visando também a obtenção de resultados quantitativos que possibilitam o engenheiro de confiabilidade, conduzir uma análise a nível de sistema com mais agilidade.

Os resultados do ensaio e as análises mostraram que a confiabilidade do produto é de 97,7% para 10 anos de vida e considerando o pior caso, com 90% de intervalo de confiança, a confiabilidade seria de 94,2%, ou seja, apenas 5,8% dos produtos, falhariam em até 10 anos.

Também, ficou claro que após 1791 h de ensaio (2,5 meses) apenas 5 amostras falharam o que indica que os fatores de stress podem ser mais elevados, diminuindo assim o tempo de ensaio e tendo mais falhas durante o mesmo para uma melhor análise estatística.

Apesar de algumas restrições e premissas utilizadas com essa metodologia, os ganhos de tempo e recursos são expressivos, quando comparados com a metodologia proposta para os trabalhos futuros, que seria mais completa, porém com uma demanda maior de recursos de tempo, financeiro e de alocação dedicada de um engenheiro de confiabilidade.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Em um segundo passo da análise de confiabilidade, como proposta de trabalho futuro, pode-se primeiramente, avaliar os reais tipos de stresses que o produto é suscetível, por exemplo, vibração, ciclo térmico, tensão, *in rush*.

Uma proposta de metodologia seria:

- Brainstorming com os engenheiros de produto e campo para elencar quais os possíveis stresses aplicados ao produto durante a aplicação;
- Condução de um DOE, avaliando quais os stresses e as interações entre eles realmente influenciam na vida do produto;
- Com os principais fatores de stresses, realizar os ensaios de vida acelerado (mínimo 3 em diferentes níveis de stresses) considerando os resultados do DOE;
- Com os dados de falha, conduzir um estudo de confiabilidade do produto.

Tal metodologia traz um conhecimento mais acurado das métricas de confiabilidade para o produto, também um entendimento muito maior dos fatores de stresses significantes para o mesmo e abre outras possibilidades de análises em blocos (RBD) do mesmo produto.

Porém, essa metodologia, conforme já comentado, possui o viés na indústria que geralmente são as restrições de recursos financeiros, de tempo e alocação dedicada para a condução do trabalho.

## REFERÊNCIAS

CONNOR, Patrick O.; KLEYNER, Andre. **Practical Reliability Engineering**. 5. ed. West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. 512 p.

CROWE, Dana; FEINBERG, Alec. **Design for Reliability**. 1. ed. California, Estados Unidos: CRC Press, 2001. 256 p.

CYRINO, Luis. **Curva da banheira – parte II**. Disponível em: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/curva-da-banheira-parte-ii/>. Acesso em: 15 de Junho 2019.

DUARTE, Ronaldo Ribeiro. **VCC Seminar – EECON Qingdao**. Material de treinamento para Embraco Qingdao, Qingdao, China. 2007.

ELETRO PEÇAS REAL. **Como funciona um circuito de refrigeração?**. Disponível em: <http://eletropecasreal.com.br/blog/como-funciona-um-circuito-de-refrigeracao/>. Acesso em: 11 de junho 2019.

EMBRACO. **Linha de produtos para refrigeração comercial – Catálogo Embraco**. Joinville. 2016.

ESCOBAR, Luis A.; MEEKER, Willian Q. A Review of Accelerated Test Models. **A Review of Accelerated Test Models**, Washington DC, Estados Unidos, v. 21, n. 4, p. 552–577, Jan/Dez. 2006.

HALLBERG, Örjan; PECK, Stewart. Recent humidity Accelerations: A base for testing standards. **Quality and reliability engineering international**, Nova Jersey, Estados Unidos, v. 7, p. 169-180, 1991.

HARTMAN, Creig. **What is a variable frequency drive**. Disponível em: <https://www.vfds.com/blog/what-is-a-vfd>. Acesso em: 15 de Junho 2019.

JOINT ELECTRON DEVICE ENGINEERING COUNCIL. **JEDEC122D**: Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices. Washington DC, Estados Unidos, 2009.

RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT. **MIL-HDBK-217F**. Washington DC, Estados Unidos, 1995.

RELIASOFT BRASIL. **RS 401** – Análise de dados de vida. São Paulo. 2007.

RELIASOFT BRASIL. **RS 404** – Crescimento da confiabilidade. São Paulo. 2008.

RELIASOFT BRASIL. **RS 521** – Ensaaios acelerados de vida avançados. São Paulo. 2007.

RELIASOFT BRASIL: **RS 522** – Ensaaios acelerados de vida avançados. São Paulo. 2010.

RELIASOFT PUBLISHING. Location parameter of the weibull distribution, this issue's reliability basic. Disponível em: <https://www.weibull.com/hotwire/issue15/relbasics15.htm>. Acesso em: 17 de Maio 2019.

RELIASOFT PUBLISHING. Weibull distribution: characteristics of the weibull distribution. Disponível em: <https://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm>. Acesso em: 17 de Maio 2019.

RELIASOFT. Reliability theory and reliability data analysis and modeling resources for reliability engineers. Disponível em: <http://weibull.com/>. Acesso em: 15 de Junho 2019.

RELIASOFT. Statistical analysis using the weibull model and other lifetime distributions. Disponível em: <https://www.weibull.com/basics/lifedata.htm>. Acesso em: 15 de Junho 2019.

SPANÓ, Cláudio Caiani. **Ensaaios Acelerados de Vida**. Apostila do curso de pósgraduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.

SRIVASTAVA, Preeti Wanti. **Optimum Accelerated Life Testing Models with Time-Varying Stresses**. 1. ed. Londres, Reino Unido: World Scientific Publishing Europe Ltd., 2012. 444 p.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2008