



**HALT/QALT/HASS Testing Support na
Bosch Termotecnologia S.A.**

Filipa Raquel Quintas Fortuna

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Maria Teresa Galvão

Orientador na Empresa: Eng.º Luís Sousa



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão**

2009-07-02

*“If you bet on a horse, that's gambling.
If you bet you can make three spades, that's entertainment.
If you bet the structure will survive for a hundred years, that's engineering.
See the difference?”
Ephraim Suhir*

Resumo

Esta dissertação pretende investigar uma nova metodologia de testes de fiabilidade, que têm como objectivo melhorar a fiabilidade dos produtos.

Esta metodologia estimula falhas nos produtos, utilizando, para isso, condições ambientais acima da que são usadas na vida quotidiana, e assim, num curto espaço de tempo consegue-se determinar e melhorar a fiabilidade de um determinado produto.

Assim, para uma melhor compreensão, primeiramente, foram investigados os três tipos de testes propostos – HALT, QALT e HASS.

Como estes tipos de testes não apresentam procedimentos standards, foi estudado o componente testado, uma válvula solenóide, e por foram definidos e implementados testes para este componente.

Este é um tema muito abrangente, e ainda pouco explorado. Neste sentido, esta dissertação é um pequeno passo para a divulgação e implementação destes testes em novos produtos.

Os metodos descritos nesta tese não são restritos a aplicação em válvulas solenoides, mas podem ser empregues em produtos similares.

HALT/QALT/HASS Testing Support

Abstract

This essay intends to investigate a new reliability tests methodology. This methodology's goal is to improve the reliability of the products.

This methodology stimulates products failures, using environmental conditions above those used which are used in normal products' use. That way, in a short period of time it's possible to determinate and improve product's reliability.

Therefore, a better understanding, first it was investigated the three types of tests proposed – HALT, QALT e HASS.

As these types of tests do not have standard procedures, it was studied the tested product, a solenoid valve, and tests have been defined and implemented for this product.

This is a very comprehensive, and yet little explored subject. Accordingly, this dissertation is a small step for the dissemination and implementation of these tests on new products. The methods described in this thesis are not restricted to application in solenoid valves, but can be used in similar products.

Agradecimentos

Aos meus pais e ao meu irmão pelo seu amor e infinita paciência.

Aos meus amigos que me acompanham em todos os momentos e que estão sempre disponíveis para me ajudar.

À Bosch Termotecnologia S.A. pela oportunidade dada para a realização deste projecto, pelas óptimas condições proporcionadas e por todo o apoio disponibilizado.

A todas as pessoas da empresa com quem tive a oportunidade de trabalhar, que se demonstraram em todos os momentos disponíveis para me ajudar, em particular ao Eng.º Luís Sousa pelo seu profissionalismo e orientação. Ao Eng.º Nuno Mateus pelos seus ensinamentos e disponibilidade, e a todos os colaboradores do laboratório de Fiabilidade, que ajudaram na realização deste projecto.

À Professora Doutora Maria Teresa Galvão pelo seu incentivo, apoio e motivação, que generosamente me ofereceu ao longo deste projecto.

Índice de Conteúdos

Resumo	iii
Abstract	iv
Agradecimentos	v
Índice de Conteúdos	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Gráficos	ix
Lista de Equações	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
1.1 Grupo Bosch	1
1.1.1 Bosch Termotecnologia	2
1.2 Enquadramento do Projecto	4
1.3 Temas Abordados e sua Organização no Presente Relatório	4
2 Enquadramento Teórico	5
2.1 Fiabilidade	5
2.2 Testes de Vida Extremamente Acelerados	7
2.2.1 Integração dos testes no ciclo de vida produtivo	8
2.2.2 Stress	10
2.2.3 HALT	14
2.2.3.1 Processo do HALT	14
2.2.3.2 Vantagens	17
2.3.3.3 Desvantagens	17
2.3.4 QALT	17
2.3.4.1 Métodos de Aceleração	18
2.3.4.2 Factor de Aceleração	18
2.3.4.3 Extrapolação de dados	19
2.3.4.4 Procedimentos de Análise	20
2.3.4.5 Vantagens	21
2.3.4.6 Desvantagens	21
2.3.5 HASS	21
2.3.5.1 O processo do HASS	21
2.3.5.2 Vantagens	24
2.3.5.3 Desvantagens	24
2.3.6 Impacto na Fiabilidade de HALT e HASS	24
3 Definição dos testes de vida acelerados	26
3.1 Descrição da Válvula	26
3.2 Definição dos Stresses	28
3.3.1 HALT	30
3.3.1.1 Tensão	30
3.3.1.2 Frequência	32

3.3.1.3	Temperatura	32
3.3.1.3.1	Step Stress Térmico	33
3.3.1.3.2	Choque térmico	34
3.3.1.3.3	Proposta para gerir os limites do HALT	35
3.4	QALT	36
3.4.1	Choque Térmico	36
3.4.2	Tensão <i>Step Stress</i>	37
3.5	HASS	38
4	Implementação de Testes e Resultados	41
4.1	HALT	41
4.1.1	Amostras	41
4.1.2	Tensão <i>Step Stress</i>	43
4.1.3	Frequência <i>Step Stress</i>	44
4.1.4	Teste de Stress Combinado	45
4.1.5	Conclusões	48
4.2	QALT	49
4.2.2	Conclusões	52
5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	53
6	Referências	55
7	Anexo A: Distribuições de Vida	56
8	Anexo B: Dados recolhidos dos testes (HALT)	61

Lista de Figuras

Figura 1 – Áreas de Negócio do Grupo Bosch e suas divisões.....1

Figura 2 – Grupos da divisão de Termotecnologia.....2

Figura 3 – Instalações da Bosch Termotecnologia.....2

Figura 4 – Clientes Bosch no Mundo.....3

Figura 5 – Curva da Banheira.....6

Figura 6 - Tipos de testes extremamente acelerados.....8

Figura 7 – Integração dos testes no ciclo de vida do produto.....9

Figura 8 – Aumento das Falhas com a redução da Resistência.....10

Figura 9 – Aumento das Falhas com o aumento do stress.....11

Figura 10 – Stress constante ao longo do tempo.....12

Figura 11a) – Stresses variáveis ao longo do tempo - *Step Stress*.....13

Figura 11b) – Stresses variáveis ao longo do tempo – Progressivo.....13

Figura 11c) – Stresses variáveis ao longo do tempo – Cíclico.....13

Figura 11d) – Stresses variáveis ao longo do tempo – Aleatório.....13

Figura 12 – Ciclo do HALT.....15

Figura 13 – Diagrama Representativo do crescimento da margem, antes e depois do HALT.16

Figura 14 – *Screens* de precipitação e de detecção do HASS.....23

Figura 15 – Diagrama do processo do HASS.....24

Figura 16 – Efeitos do HALT e do HASS na fiabilidade.....25

Figura 17a) – Esquema da válvula solenóide fechada.....26

Figura 17b) – Esquema da válvula solenóide aberta.....27

Figura 18 – Campo magnético criado pela bobina.....28

Figura 19 – Diagrama estatístico térmico.....36

Figura 20 – Válvula tipo “A”.....41

Figura 21 – Válvula tipo “B”.....42

Figura 22 – Aspecto da bobina da válvula após esta ter queimado.....46

Figura 23 – Bolha formada aquando da falha da válvula.....49

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Representação das funções fiabilidade e probabilidade acumulada de falhas.....5

Gráfico 2 – Percentagem de falhas descobertas por tipo de stress..... 11

Gráfico 3 – Procedimento de análise para o QALT.....20

Gráfico 4 – Perfil de Tensão *Step Stress*.....31

Gráfico 5 – Perfil de Frequência *Step Stress*.....32

Gráfico 6 – Perfil do *Cold Step Stress*33

Gráfico 7 – Perfil do *Hot Step Stress*34

Gráfico 8 – Perfil do Choque Térmico35

Gráfico 9 – Perfil da Tensão *Step Stress*.....38

Gráfico 10 – Perfil do HASS.....40

Gráfico 11 – Aquecimento da Bobina em função da Tensão.....43

Gráfico 12 – Aquecimento da Bobina em função da Resistência.....43

Gráfico 13 – Aquecimento da Bobina em função da Frequência.....44

Gráfico 14 – Aquecimento da Bobina em função da Resistência.....44

Gráfico 15 – Perfil do Teste Combinado.....45

Gráfico 16 - Aquecimento da Bobina em função da Tensão.....46

Gráfico 17 - Aquecimento da Bobina em função da resistência.....46

Gráfico 18 – Evolução do aquecimento da Bobina em função do tempo de teste.....47

Gráfico 19 – Aumento do aquecimento da bobina em função da Resistência.....48

Gráfico 20 - Efeito do parâmetro λ na função distribuição de probabilidade exponencial.....56

Gráfico 21 - (a) Efeito do parâmetro β na função densidade de probabilidade (Weibull).....57

Gráfico 21 - (b) Efeito do parâmetro η na função densidade de probabilidade (Weibull).....57

Gráfico 22 - (a) Efeito do parâmetro $\sigma T'$ na função densidade de probabilidade Lognormal..58

Gráfico 22 - (b) Efeito do parâmetro T' na função densidade de probabilidade Lognormal...58

Lista de Equações

Equação 1 – Função Fiabilidade..... 5

Equação 2 – Taxa de falha instantânea..... 6

Equação 3 – Factor de Aceleração 19

Equação 4 – Intensidade do Campo Magnético para bobinas 28

Equação 5 – Potência Instantânea 29

Equação 6 – Lei de Ohm para corrente alternada..... 29

Equação 7 – Forma de onda da corrente..... 29

Equação 8 – Corrente em função da frequência 30

Equação 9 – Fórmula do aquecimento do *Coil*..... 30

Equação 10 – Cálculo da Temperatura média de teste..... 36

Equação 11 – Equação de Arrhenius 37

Equação 12 – Factor de aceleração..... 37

Equação 13 – Lei da Potência Inversa..... 38

Equação 14 – Extremos do *precipitation screen* a) superior b) inferior 39

Equação 15 – Extremos do *detection screen* a) superior b) inferior 39

Equação 16 – vida característica 51

Equação 17 - η em função dos stresses 51

Equação 18 – Função densidade probabilidade (Exponencial)..... 56

Equação 19 - Função probabilidade acumulada (Exponencial) 56

Equação 20 – Taxa de falhas instantâneas (Exponencial)..... 56

Equação 21 – MTBF (Exponencial)..... 56

Equação 22 – Função densidade probabilidade 3 parâmetros (Weibull) 57

Equação 23 - Função densidade probabilidade 2 parâmetros (Weibull)..... 57

Equação 24 - Função probabilidade acumulada (Weibull) 58

Equação 25 - Taxa de falhas instantâneas (Weibull)..... 58

Equação 26 – MTBF (Weibull)..... 58

Equação 27 – Função Gama 58

Equação 28 - Função densidade probabilidade (LogNormal)..... 59

Equação 29 - Função probabilidade acumulada (LogNormal)..... 59

Equação 30 – Taxa de falhas instantâneas (LogNormal) 59

Equação 31 – MTBF (LogNormal) 60

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estimativa de melhoria da fiabilidade em relação a vários tipos de stress 14

Tabela 2 – Características das válvulas tipo “A” 41

Tabela 3 – Características das válvulas tipo “B” 42

Tabela 4 – Designação das válvulas usadas em cada teste 42

Tabela 5 - Valores registados após cada válvula ter falhado 47

Tabela 6 - Valores registados após cada válvula ter falhado 48

Tabela 7 - Tempos de falha das válvulas testadas 49

Tabela 8 – Parametros da Distribuição - válvulas “A” 51

Tabela 9 – Valores de a_0 , a_1 e a_2 - válvulas “A” 51

Tabela 10 – Parâmetros de Distribuição -válvulas “B” 52

Tabela 11 - Valores de a_0 , a_1 e a_2 - válvulas “B” 52

Tabela 12 - Tensão Step Stress 61

Tabela 13 - Frequência Step Stress 62

Tabela 14 - Teste de stress combinado I 63

Tabela 15 - Teste de stress combinado II 65

Acrónimos e Abreviaturas

MOS – Material Order Specification

PPM – Partes por milhão

QMM – Quality Management & Methods

HALT – Highly Accelerated Life Testing

QALT – Quantitative Accelerated Life Testing

HASS - Highly Accelerated Stress Screening

LOL – Lower Operation Limit

UOL – Upper Operation Limit

LDL – Lower Destruct Limit

UDL – Upper Destruct Limit

MTBF - Mean Time between Failures

MTTF - Mean Time to Failure

1 Introdução

Actualmente, assiste-se à constante mutação dos mercados. As empresas evoluem os seus processos cada vez mais depressa, de modo a anteciparem-se, disponibilizando produtos mais inovadores e lançando-os mais cedo no mercado que os seus concorrentes. Os consumidores vêem assim alargada a oferta do mercado, são cada vez mais exigentes e menos fiéis e, por estas razões, factores como a qualidade são cada vez mais fulcrais para marcar a diferença na competitividade do mercado global.

A Bosch Termotecnologia S.A. sempre primou pela excelência no que diz respeito aos seus produtos, mantendo sempre elevados padrões no que diz respeito à qualidade e fiabilidade dos mesmos. E é sobre a fiabilidade, mais concretamente sobre a implementação de uma nova metodologia de testes, que esta tese trata.

1.1 Grupo Bosch

Em 1896, Robert Bosch deu os primeiros passos para a criação de uma empresa que se tornaria numa multinacional conceituada e num dos maiores grupos da Alemanha, criando em Estugarda a Oficina Mecânica de Precisão.

Mas cedo a empresa começou a expandir as suas áreas de negócio, e assim a Junkers & Co, empresa fundada por Hugo Junkers em 1895, é integrada na Robert Bosch GmbH em 1932, marcando o início da Divisão Termotécnica da Bosch.

Actualmente o grupo encontra-se estruturado em três grandes áreas de negócio, no entanto, estas encontram-se decompostas em divisões (Figura 1). A Bosch Termotecnologia integra a divisão de Termotecnologia.

Tecnologia Automóvel	Tecnologia Industrial	Bens de Consumo e Tecnologias de Construção
<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de Gasolina • Sistemas Diesel • Sistemas de Chassis • Sistemas de Energia • Electrónica de Carroçaria • Multimédia Automóvel • Electrónica Automóvel • Acessórios Automóvel • Sistemas de Direcção 	<ul style="list-style-type: none"> • Bosch Rexroth • Tecnologia de Embalamento • Energia Solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Ferramentas Eléctricas • Termotecnologia • Electrodomésticos • Sistemas de Segurança

Figura 1 – Áreas de Negócio do Grupo Bosch e suas divisões

No entanto, para dar uma resposta mais efectiva às necessidades dos clientes já em 2009 foi feita a divisão de Termotecnologia consoante o grupo de produtos que produz, (Figura 2).

Assim a Bosch Termotecnologia pertence ao grupo TT-DW, pelo qual é responsável.

TT-AC Air Conditioning/ Ventilation	TT-DW Domestic Hot Water	TT-FB Floor Standing Boilers	TT-HP Heat Pumps	TT-MD Merchandise	TT-WB Wall Mounted Boilers	TT-SPS Spare Parts Service
Fort Lauderdale	<ul style="list-style-type: none"> Aveiro Eibelshausen TTCB (Nanjing) TTCS (30% Shanghai) Wettringen 	<ul style="list-style-type: none"> Lollar Albrechtice Clay Cross Hirzenhain Knov Neukirchen 	Tranås	Wetzlar	<ul style="list-style-type: none"> Wernau Buinen Deventer Drancy Manisa St. Thegonnec Worcester 	<ul style="list-style-type: none"> Wernau Lollar
Heat pumps	Solar thermal system (STS) Gas instantaneous water heater (GWT) Electric water heater (EWB) Gas and oil storage tank directly heated (GWS-d) Gas and oil storage tank indirectly heated (GWS-i)	Electric / Solid fuel boiler (EZK/FZK) Floor standing gas boiler condensing (GZK-B) Floor standing gas boiler standard (GZK-K) Floor standing jet burner boiler condensing (GZK-B) Floor standing jet burner boiler standard (JZK-K) Controls for floor standing boilers Accessories BHT Radiator	Heat pumps	Merchandise	Wall mounted gas boiler condensing (GZT-B) Wall mounted gas boiler standard (GZT-K) Controls for wall mounted boilers	Spare parts

Figura 2 – Grupos da divisão de Termotecnologia (Imagem retirada do site de acesso exclusivo a colaboradores BOSCH)

1.1.1 Bosch Termotecnologia

A Vulcano, fundada em 1977, (Figura 3), dedicou-se ao fabrico e comercialização de esquentadores em Portugal, estabelecendo um contrato de licenciamento com Robert BOSCH para a transferência da tecnologia da Junkers.



Figura 3 – Instalações da Bosch (Imagem retirada do site de acesso exclusivo a colaboradores BOSCH)

Tendo uma clara visão estratégica, a empresa lança em 1983 a marca própria – Vulcano, atingindo dois anos mais tarde líder nacional na produção de esquentadores. A par de

novos produtos é feita aposta na criação de um serviço de assistência pós-venda, factor que contribuiu para o aumento do prestígio da marca.

No ano de 1988, o grupo BOSCH adquire a maioria do capital Vulcano, passando a marca a fazer parte da divisão Termotécnica da BOSCH. Com esta mudança, a Vulcano passa a Vulcano Termodomésticos, S.A., deste modo, equipamentos e conhecimentos do grupo são transferidos para Portugal.

Tendo ao longo dos anos consolidado uma posição de relevo, em 1992 a Vulcano Termodomésticos, S.A. atinge o lugar de Líder de Mercado Europeu e terceiro produtor Mundial de esquentadores.

Em 1995, inicia a produção de caldeiras a gás, que hoje constitui uma parte importante do negócio.

Em 2002, a Vulcano Termodomésticos SA torna-se Centro de Competência com responsabilidade Mundial no Grupo Bosch do produto esquentador, estando sob a sua tutela a concepção e desenvolvimento de novos aparelhos bem como a sua fabricação e comercialização.

O ano de 2007 fica marcado pelo arranque da produção de painéis solares térmicos, sendo a Vulcano responsável pela sua concepção e desenvolvimento.

No ano transacto, a Vulcano muda de nome sendo agora designada de BOSCH Termotecnologia, S.A.

Com a oferta de uma grande variedade de modelos, que são comercializados internacionalmente através de marcas próprias do grupo, a BOSCH Termotecnologia está presente em 55 países (Figura 4).

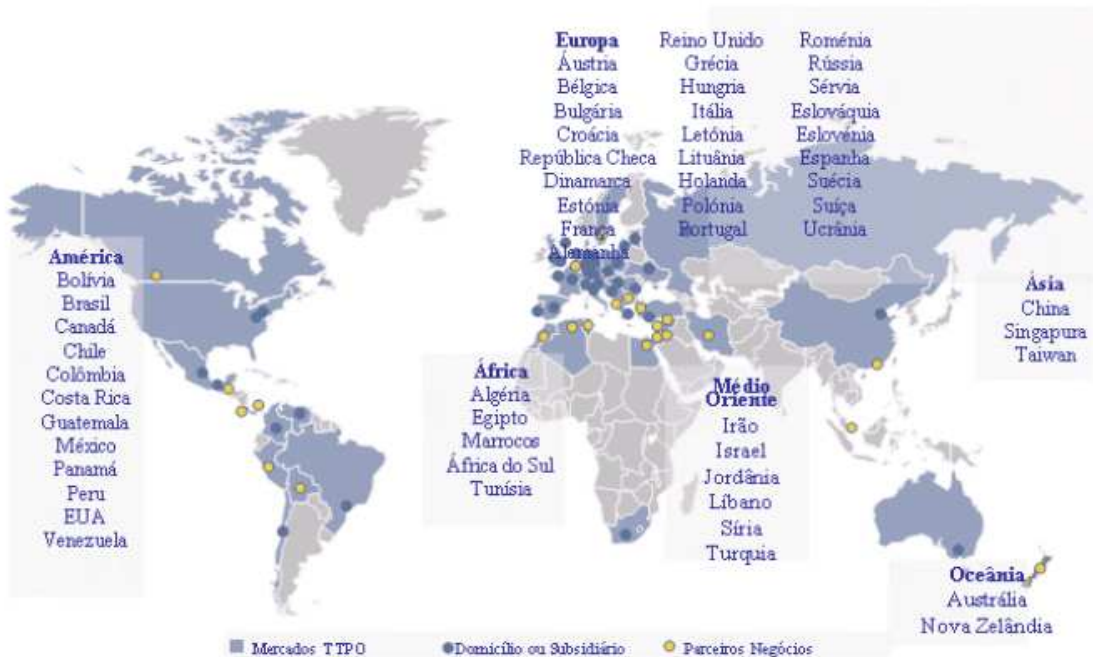


Figura 4 – Clientes Bosch no Mundo (Imagem retirada do site de acesso exclusivo a colaboradores BOSCH)

1.2 Enquadramento do Projecto

Este projecto esteve inserido no trabalho do departamento QMM (*Quality Management and Methods*). Este departamento tem como objectivo desenvolver projectos que visam melhorar o desempenho dos outros departamentos na área da qualidade.

A secção do QMM-1ZQ (Teste ao Produto), onde o projecto foi desenvolvido, é uma parte integrante do QMM.

Esta secção é responsável pelo laboratório de fiabilidade. A este laboratório compete por um lado analisar o tempo de vida de cada componente utilizado na produção de cada produto, e por outro, analisar o tempo de vida do produto final.

Assim, pode afirmar-se que a sua missão é garantir que os produtos comercializados pela empresa mantêm, ao longo do tempo, a qualidade que esta confere a cada produto que comercializa.

A responsabilidade do laboratório inicia-se nos produtos ainda em fase de desenvolvimento, e passa por praticamente todas as etapas produtivas, até mesmo depois de o produto estar lançado no mercado. É necessário garantir que a qualidade dos produtos está dentro das normas, especificações e protocolos definidos pela fábrica, pelo Grupo Bosch e entidades externas que regulamentam a qualidade e segurança.

Porém, controlar o funcionamento de um aparelho a trabalhar regularmente, seria insustentável para qualquer laboratório deste tipo. Isto deve-se especialmente ao elevado tempo de obtenção de respostas.

A solução passa por substituir o tempo real por um mais curto, em condições de trabalho especiais.

Assim, da necessidade de estudar e desenvolver novos métodos que permitam analisar a fiabilidade num curto espaço de tempo, surge este projecto que visa o estudo da metodologia HALT/QALT/HASS e a sua posterior implementação aos produtos desenvolvidos pela empresa.

1.3 Temas Abordados e sua Organização no Presente Relatório

O capítulo 2 apresenta os conceitos de Fiabilidade e da metodologia HALT, QALT e HASS. Nesse capítulo, são abordados os fundamentos teóricos que serviram de base ao projecto realizado.

No capítulo 3 é apresentado o componente a ser testado, e a definição dos testes que irão ser implementados.

No capítulo 4, são implementados os testes e apresentados e analisados os seus resultados obtidos. É feita uma exposição dos dados obtidos e das consequências desses resultados.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões do projecto realizado e proposta de trabalhos futuros.

2 Enquadramento Teórico

2.1 Fiabilidade

A fiabilidade de um produto contribui, fortemente, para a qualidade e a competitividade de uma empresa. Actualmente, o mercado impõe a estas, o desafio de desenvolverem novos produtos com o menor custo e tempo possíveis, garantindo que os seus níveis de fiabilidade se mantêm, ou preferencialmente, são aumentados gastando estas, para isso, somas avultadas de dinheiro.

A fiabilidade é o aspecto da qualidade relacionada com o tempo e pode ser entendida “como a capacidade de um bem desempenhar a sua função específica em condições definidas e por um período de tempo determinado.” (Didelet, 2003), ou de um modo mais simplista, pode ser vista, como a “ausência de falhas nos produtos” (Barnard, 2008). Ou seja, para se conseguir avaliar a fiabilidade é necessário quantificar a vida do produto. Então, matematicamente, esta é definida como a probabilidade de um produto sobreviver por um intervalo de tempo específico, isto é, sem falhas e pode ser representada pela seguinte equação:

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

Equação 1 – Função Fiabilidade

onde, $F(t)$ é a função de distribuição acumulada correspondente à $f(t)$, que é a função densidade de probabilidade do tempo para falha, a qual representa a distribuição de falhas ao longo do tempo (Luciana Veloso de Luca, 2004), e graficamente:

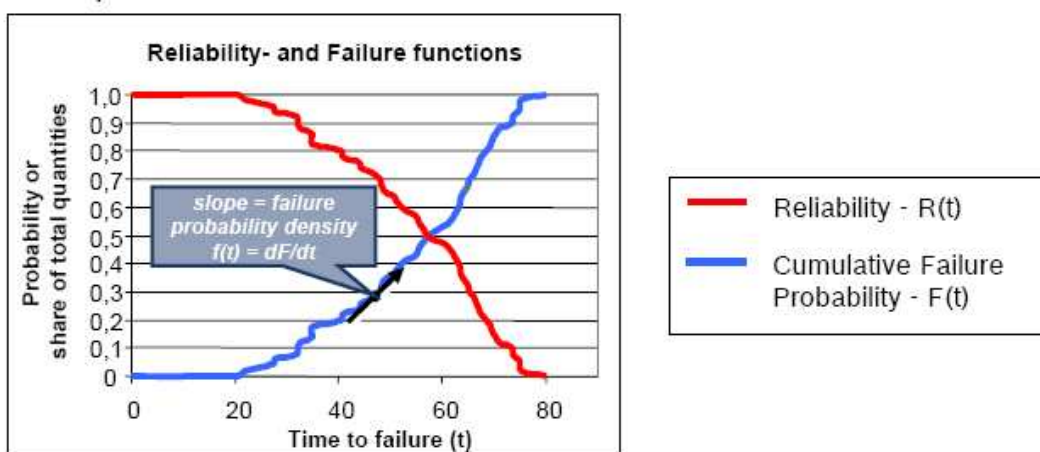


Gráfico 1 – Representação das funções fiabilidade e probabilidade acumulada de falhas

A partir da observação do gráfico, pode aferir-se que a fiabilidade não é constante ao longo do tempo, vai decaindo à medida que este avança, ou seja, para um determinado sistema quanto maior for o seu tempo de operação, maior é a sua probabilidade de falhar. Este facto pode ser mais bem compreendido através da taxa de falha instantânea, que é definida como “a probabilidade de um componente que sobreviveu até ao instante t, falhar no instante seguinte” (Bernardo Almada-Lobo, 2008) e que é dada pela seguinte expressão:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Equação 2 – Taxa de falha instantânea

Em que $f(t)$ representa a função densidade probabilidade de falha, e $R(t)$ a função fiabilidade.

A evolução da taxa de falha instantânea ao longo da vida operacional do produto é representada pela curva da banheira que é mostrada na figura seguinte:

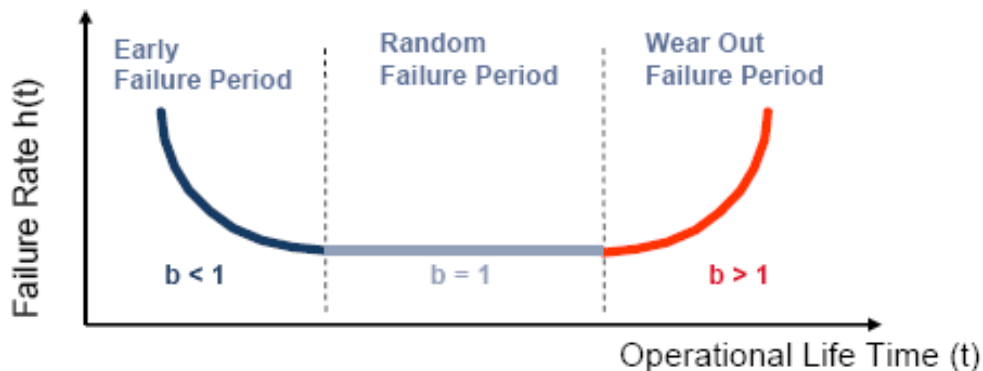


Figura 5 – Curva da Banheira

Como se pode observar, a vida de um produto pode ser dividida em três períodos distintos, no que concerne à taxa de falha instantânea. O primeiro corresponde às falhas que ocorrem no início da sua vida, e é denominado como período de falhas precoces ou mortalidade infantil, sendo esta denominação uma clara analogia com os seres humanos. Neste período as falhas são inerentes ao produto e podem ser causadas por erros de design ou de processo produtivo, controlo de qualidade pobre ou ainda causadas por defeitos dos materiais, sendo a taxa decrescente com o tempo até atingir o período seguinte, denominado período de vida útil ou maturidade. Neste intervalo de tempo, que é normalmente aquele em que o produto chega até ao consumidor, a taxa de falhas apresenta um valor pequeno e aproximadamente constante, aqui as falhas ocorrem devido a aumentos de carga inevitáveis ou inesperadas. Por fim, no último período de

vida do produto, designado como período de desgaste, a taxa de falhas é crescente e estas são causadas pela deterioração da resistência devido a uma série de processos físicos e químicos, como envelhecimento, corrosão e oxidação.

A curva da banheira não representa a taxa de falhas de um único produto, mas de uma população inteira da mesma categoria, por essa razão, para uma dada categoria, alguns produtos falharão na região de mortalidade infantil, outros no período de maturidade e ainda outros, espera-se a maioria, falharão no período de desgaste. É ainda importante referir que cada um dos intervalos de tempo da curva da banheira não é igual para todas as categorias de produtos, visto o ciclo de vida não ser o mesmo pois cada categoria tem uma determinada curva característica.

Para descrever o comportamento de falhas de um produto e possibilitar análises de fiabilidade, são utilizadas distribuições estatísticas, chamadas de distribuições de vida. Dentre elas, destacam-se as distribuições exponencial, lognormal e Weibull de dois parâmetros, que são as mais utilizadas. Estas distribuições, servem para modelar a função densidade de probabilidade de tempo para falha $f(t)$, que é a base para chegar aos modelos matemáticos de fiabilidade (Jensen, Finn; Petersen, Niels Erik, 1982). No entanto, a distribuição Weibull é a mais adequada para representar matematicamente o comportamento da curva da banheira. (Estas distribuições encontram-se explicadas em detalhe no anexo A).

A larga maioria dos produtos é um sistema complexo constituído por múltiplos componentes, tendo sido deduzida a lei da probabilidade do produto de componentes em série, por Robert Lusser. Este teorema considera que os sistemas funcionam apenas se todos os componentes funcionarem, e é válido sob considerações especiais. A fiabilidade de um sistema é igual ao produto das fiabilidades dos componentes individuais que o constituem. Assim, a sua fiabilidade de um produto será sempre inferior à fiabilidade do seu componente mais fraco, mesmo que os restantes apresentem um valor alto.

2.2 Testes de Vida Extremamente Acelerados

A maioria dos produtos é projectada para operar anos sem falhar. Assim, é de esperar que poucas unidades falhem num teste realizado em condições normais de uso, portanto, é particularmente difícil estimar os dados relativos à fiabilidade, quer seja pela longa duração do ensaio, já que para muitos produtos existe um curto espaço de tempo entre o projecto e o seu lançamento no mercado ou pela observação de um reduzido número de falhas, facto que aumenta a incerteza na estimativa da fiabilidade (Erico Pessoa Félix, 2006).

Tornou-se, então, imperativo encontrar novos métodos para a redução do tempo para a obtenção de dados e posterior análise de falhas dos produtos e, ao mesmo tempo, que sejam o mais económico e praticáveis possíveis.

Assim, nas últimas décadas tem sido desenvolvida uma metodologia já usada desde a 2ª Guerra Mundial, pelas indústrias bélica, aeronáutica e naval, os testes de vida

extremamente acelerados que, como o próprio nome indica, aceleram a ocorrência de falhas nos produtos e permitem uma análise da fiabilidade em menor tempo.

Segundo Nelson (2005), os testes de vida acelerados são ensaios nos quais as condições ambientais em que o produto é testado estão acima do especificado e que encurtam a sua vida, ou aceleram a degradação do seu desempenho, ou seja, contrariamente aos testes tradicionais, em que o objectivo é simular o uso do produto em condições normais, estes testes pretendem estimular a ocorrência de falhas no produto.

Estes testes podem ser utilizados para fins diferentes no âmbito da fiabilidade. Primeiramente são realizados com o intuito de detectarem e revelarem modos de falha¹ e permitirem a compreensão do mecanismo físico-químico que provoca as falhas, denominado mecanismo de falha. Outro propósito destes testes, é permitir uma análise quantitativa da vida do produto, através de distribuições estatísticas das falhas. Deste modo, quando os testes realizados contemplam apenas a análise qualitativa do produto, identificação das falhas, são denominados HALT (*Highly Accelerated Life Tests*). Por outro lado, quando o objectivo é fazer previsões sobre a vida do produto sendo neste caso intitulados QALT (*Quantitative Accelerated Life Tests*) (Figura 6).

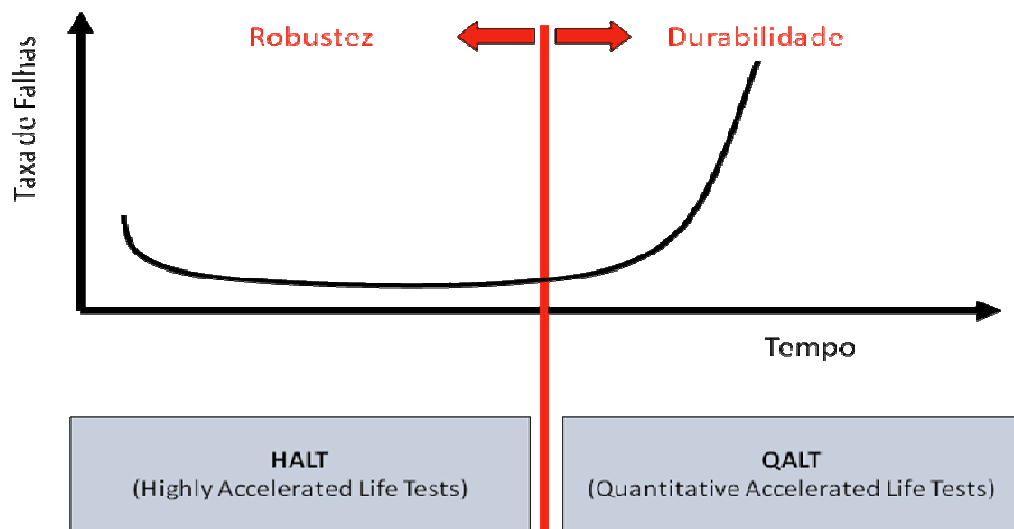


Figura 6 – Tipos de testes extremamente acelerados

2.2.1 Integração dos testes no ciclo de vida produtivo

Da perspectiva de um produtor o processo de realização de um produto deve ser minimizado no que diz respeito ao tempo e custo. Por outro lado, os consumidores esperam produtos que operem fiavelmente e que o custo de manutenção seja baixo. Este conflito de interesses motivou as empresas a integrar programas de fiabilidade² no ciclo

¹ O efeito pelo qual a falha é observada (Jensen, Finn; Petersen, Niels E, 1982)

² Série de tarefas de fiabilidade bem sequenciadas para atingir o valor alvo de fiabilidade e a satisfação do consumidor

de vida do produto. No processo produtivo, as tarefas de fiabilidade são especialmente importantes porque adicionam valor aos produtos.

Philip Crosby (1995) escreveu que “todas as não conformidades são causadas. Tudo o que é causado pode ser prevenido” Este ponto de vista indica que a fiabilidade deve focar-se na prevenção de falhas durante o desenvolvimento do produto e produção, e não na correcção das mesmas. Perceber e antecipar possíveis causas de falhas é fundamental para a sua prevenção (Bernard, 2008)

Na fase de produção torna-se impossível melhorar os níveis de fiabilidade dos produtos, por isso é essencial realizar testes ainda na fase do desenvolvimento para tentar maximizar a fiabilidade. Como existe um curto espaço de tempo entre o desenvolvimento do produto e o seu lançamento no mercado, a utilização desta metodologia permite obter informações credíveis, e com tempo suficiente para que os defeitos sejam corrigidos, assim, quando o produto chegar à fase de produção os custos de re-trabalho são menores. No entanto, nesta última fase do ciclo de vida do desenvolvimento do produto é necessário ainda realizar testes, para verificar se durante o processo produtivo não foi perdida uma parte significativa da vida do mesmo. Nesse sentido, realiza-se o HASS (*Highly Accelerated Screening Stress*) que é um ensaio através do qual é feita uma triagem dos produtos, com o propósito de identificar unidades defeituosas. Mais precisamente, a função principal do HASS é eliminar falhas de mortalidade infantil. A figura seguinte mostra o enquadramento destes testes no ciclo de vida do desenvolvimento do produto.

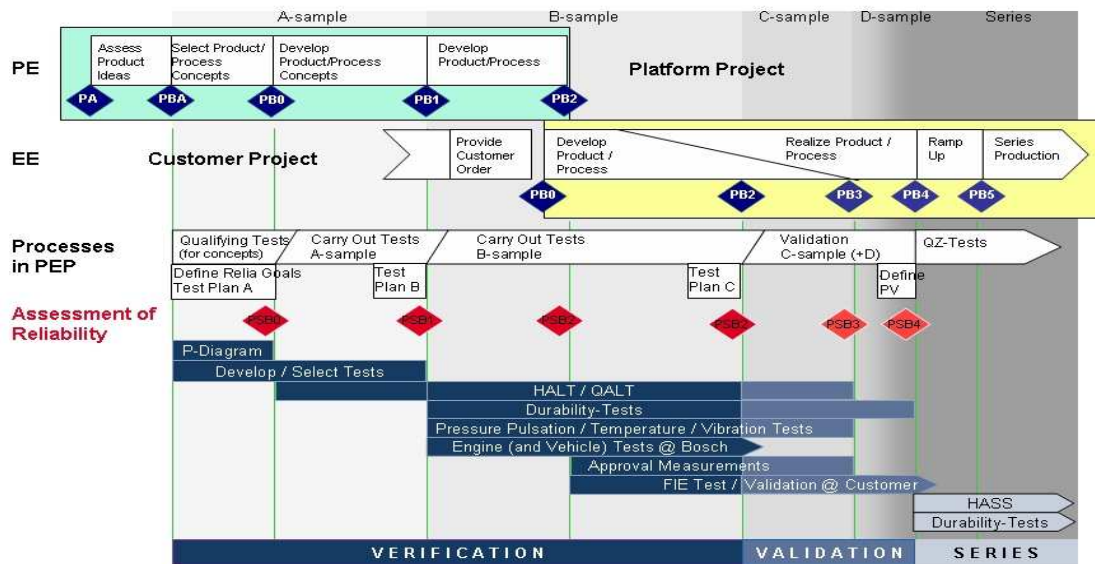


Figura 7 – Integração dos testes no ciclo de vida do desenvolvimento do produto (Imagem retirada do site de acesso exclusivo a colaboradores BOSCH)

2.2.2 Stress

Como foi referido anteriormente, o objectivo destes testes é estimular a ocorrência de falhas, de uma forma acelerada. Logo se o teste fosse realizado em condições normais de funcionamento tal poderia demorar muito tempo até se encontrarem falhas; então de modo a acelerar o processo são utilizadas, nos testes, as variáveis ambientais que se sabe *a priori* que vão fazer o produto falhar e que serão testadas a níveis de intensidade superior ao utilizado na vida real. Estas variáveis são denominadas de stress.

Nem todos os produtos são sujeitos ao mesmo nível de stress, e existem variações de robustez entre os produtos de uma dada categoria, por isso o stress e a resistência são sempre desenhados como distribuições de probabilidade (Luciana Veloso de Luca, 2004).

Em condições perfeitas, a distribuição de stress não se sobreporia à distribuição de resistência, neste caso, o produto mais fraco seria capaz de aguentar o stress mais severo. Deste modo não ocorreriam falhas.

Mas há medida que o produto envelhece, por meio de vários mecanismos de falha associados ao desgaste, a resistência do produto vai diminuindo e a sua distribuição vai sofrer uma translação para a esquerda havendo assim uma sobreposição com a distribuição de stress dando origem a falhas (Figura 8).

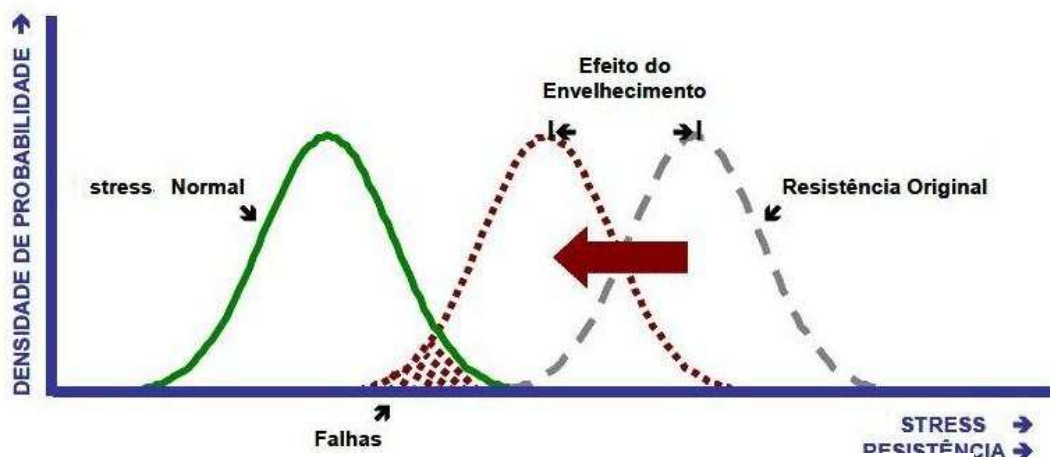


Figura 8 – Aumento das falhas com a redução da resistência

Essa deterioração pode requerer muitas horas para acontecer sob condições ambientais de uso normais, e pode ser detectada pelos métodos de testes de fiabilidade tradicionais, no entanto estes são de longa duração (Ireson, W. Grant; Coombs Jr., Clyde F., 1996). Então para se conseguir forçar uma sobreposição mais rapidamente, a distribuição de stress pode ser deslocada para a direita no sentido do aumento de stress, com isso uma sobreposição das duas distribuições acontece imediatamente, como pode ser visto na figura 9.

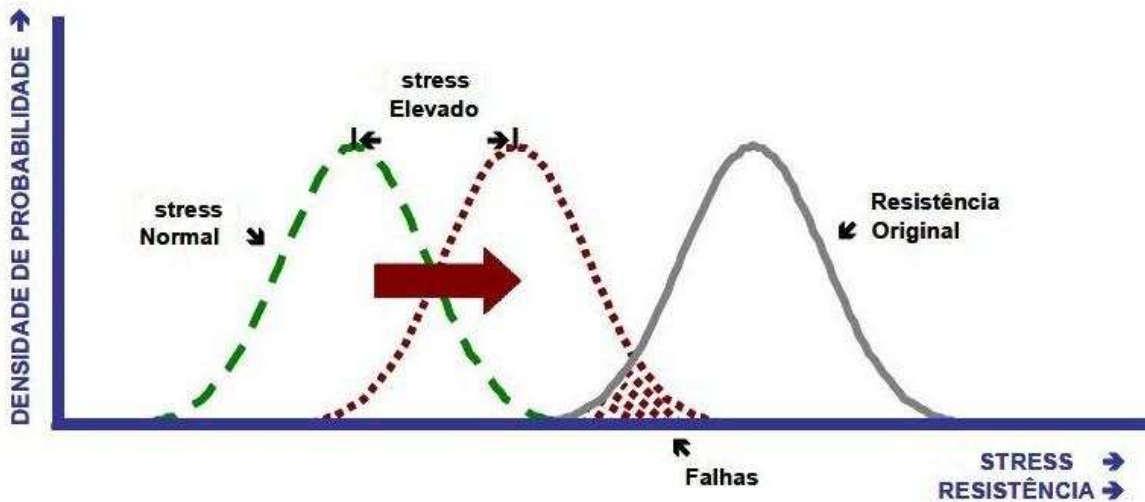


Figura 9 – Aumento das falhas com o aumento de stress

É preciso ter em atenção a escolha do stress a aplicar no teste pois não há necessidade de realizar um teste utilizando uma variável ambiental a que o produto não estará sujeito aquando do uso quotidiano, ou que não provocará a ocorrência de falhas. Neste caso, não há a melhoria da fiabilidade mas a empresa incorre num custo. Por isso, o perfil detalhado do ensaio como, tipo de stress, stress máximo e mínimo, taxa de variação, deve ser definido sob medida para cada produto e objectivo de ensaio (Luciana Veloso de Luca, 2004).

Sendo assim, a escolha do stress que será usado num determinado teste e a sua forma de aplicação depende do produto a que vai ser aplicado. A lista de testes mais utilizados inclui *Step stress* de temperatura, choque térmico, vibração aleatória, variação da tensão ou ambiente combinado como por exemplo vibração e temperatura. O gráfico seguinte (gráfico 2) mostra a percentagem de falhas descoberta por tipo de stress.

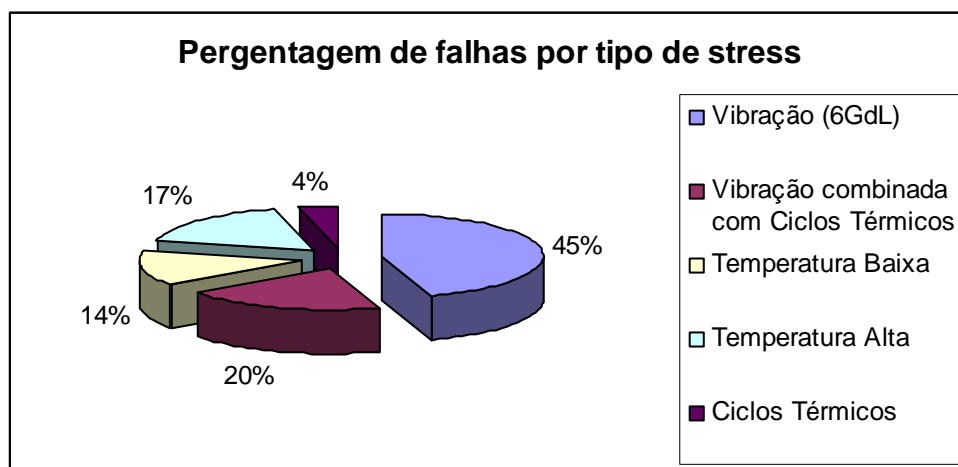


Gráfico 2 – Percentagem de falhas descobertas por tipo de teste

Os stresses podem ser aplicados individualmente ou combinados. Naturalmente, se o produto for submetido a mais que um tipo de stress simultaneamente, o teste será mais realista porque está mais próximo do seu uso na vida real, no entanto, a análise de falhas será mais difícil de executar.

Como se vê no gráfico anterior além de os stresses serem diferentes a sua forma de aplicação também difere. Seguidamente são apresentadas as diferentes formas de aplicação de stress:

A) Stress Constante

Neste caso, o stress aplicado é independente do tempo (Figura 10). Assim é definido no início do teste um determinado nível de stress e este é mantido até ao seu final.

Este modelo é de simples aplicação e os dados recolhidos são facilmente tratáveis mas a obtenção de dados é mais demorada.

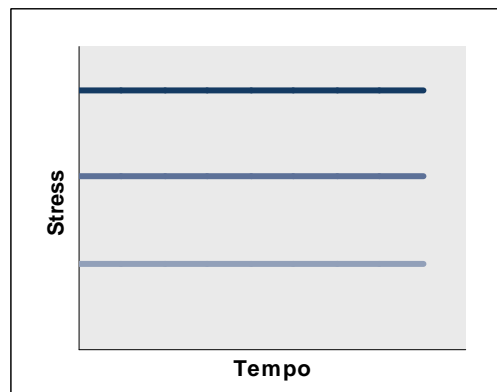


Figura 10 – Stress constante ao longo do tempo

B) Stress Variável

Quando o stress é variável, não se mantém constante ao longo do tempo. Neste caso, espera-se que haja falhas mais rapidamente que quando aplicado stress constante (Mettas, 2003).

Esta forma de aplicação pode ser conduzida de acordo com as seguintes abordagens:

Step Stress: Cada componente é submetido a um nível de stress por um período de tempo (figura 11.a). Se não falhar neste período, o nível de stress é elevado para um novo patamar e o procedimento é repetido.

A principal vantagem desta forma de aplicação de stress é levar ao aparecimento de falhas mais rapidamente. No entanto, pode suceder que os modos de falha que ocorrem nos patamares mais altos, possam diferir daqueles que ocorrem em condições normais de uso. (Freitas e Colosimo, 1997)

Progressivo: Cada componente é submetido a um nível crescente de stress, porém esse aumento não é feito por degraus como no tipo anterior, mas sim progressivamente (figura 11.b). Os testes progressivos possuem as mesmas vantagens e desvantagens dos

testes em *step stress*. Contudo, nestes pode ser difícil o controlo do nível de stress durante o teste (Nelson, 2004).

Cíclico: Cada componente é submetido a stresses de níveis alto e baixo de forma cíclica (figura 11.c) até à ocorrência de falhas. Nestes casos, a vida do componente é medida em números de ciclos até a falha.

Aleatório: Existem casos onde o componente está sujeito a níveis de stress que variam de maneira aleatória (figura 11.d). Nestes casos os testes usam stresses aleatórios seguindo a mesma distribuição de variação que ocorre durante a operação do componente, em condições normais, porém usando valores mais elevados para os níveis de stress.

Nelson (2004) destaca que tal como nos testes cíclicos, os testes aleatórios possuem características (ex. média e desvio padrão) que permitem simplificar sua execução e análise através de uma abordagem baseada em stress constante. Por exemplo, adoptando-se um valor médio para o nível de stress, ou até mesmo um valor superior ao valor médio, o teste poderia ser conduzido na forma de stress constante e os dados modelados seguindo esta abordagem.

É ainda importante considerar que à medida que o grau de severidade de stress aumenta, a duração do teste diminui. No entanto é preciso ter em conta que à medida que o nível de stress se afasta das condições normais, a incerteza na extrapolação aumenta.

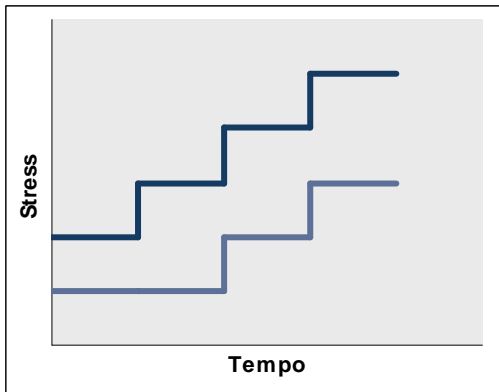


Figura 11a – Stress Stress

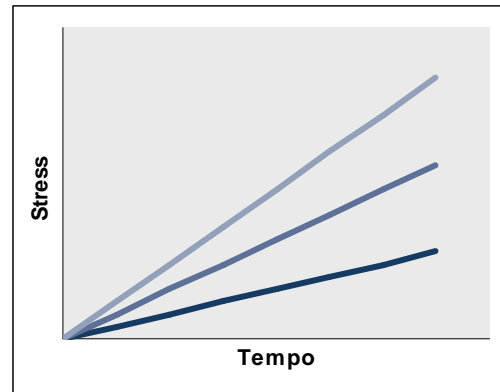


Figura 11b – Progressivo

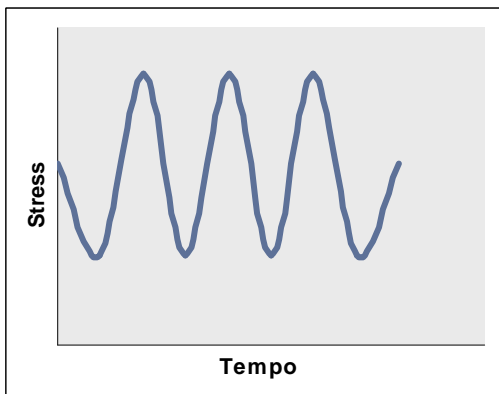


Figura 11c – Cíclico

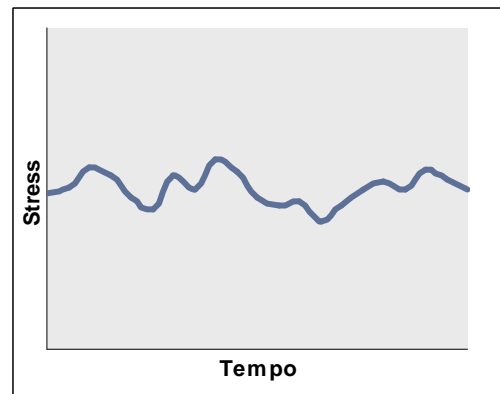


Figura 11d – Aleatório

2.2.3 HALT

Highly Accelerated Life Testing (HALT) é um método cujo objectivo é induzir rapidamente falhas nos produtos, aplicando o stress de uma maneira controlada, de modo a que sejam detectados mecanismos de falha. Assim as falhas são detectadas em poucas horas, em vez de demorar semanas a partir dos testes tradicionais ou até anos no mercado. Este método não pretende determinar a fiabilidade mas melhorá-la.

O Dr. Gregg Hobbs pioneiro no processo do HALT e patenteador do termo afirma: “Cada ponto fraco encontrado constitui uma oportunidade de melhorar o design ou os processos, o que levará à redução do tempo da fase de design, aumento da fiabilidade e diminuição dos custos”.

A aceleração da falha ocorre através do uso de stresses que são aplicados não-uniformemente em vários níveis de intensidade chamados *step stresses*. Qualquer stress pode e deve ser aplicado se o produto a ele for sensível. (Lou Gullo, 2008).

Este tipo de testes pode ser aplicado a uma larga variedade de produtos, no entanto, na maioria dos casos os produtos testados são eléctricos ou electromecânicos.

A figura seguinte mostra quais são os objectivos em termos de melhoria dos parâmetros mais usuais de stress.

Tabela 1 – Estimativa de melhoria da fiabilidade em relação a vários tipos de stress

Parâmetro	Valor-Alvo do HALT
Alta Temperatura Operacional	40°C acima da temperatura máxima operacional
Baixa Temperatura Operacional	20°C abaixo da temperatura mínima operacional
Tensão de entrada alta	30% superior à tensão máxima operacional
Tensão de entrada baixa	Não se observa degradação com a tensão inferior ao valor mínimo
Alta corrente	50% superior à corrente normal
Vibração aleatória	Nível de vibração superior a 10g-rms

2.2.3.1 Processo do HALT

HALT além de um método de testes permite adquirir um maior conhecimento sobre o produto. Não há procedimentos standard e, por isso, experiências obtidas em testes realizados ou informação extraída da literatura são uma mais-valia para uma correcta definição dos mesmos, porque antes de realizar o teste é extremamente importante definir qual é o componente do produto que vai ser testado, quais os stresses que vão ser

aplicados, o que constitui uma falha e ainda quantas unidades serão sujeitas ao HALT. Segundo Harry W. McLean devem ser escolhidas 4 válvulas para cada teste. É possível realizar o teste com menos unidades, todavia, o grau de confiança estatístico é muito menor, assim como a probabilidade de encontrar falhas.

Depois de todos os parâmetros anteriormente referenciados terem sido definidos realiza-se o teste. É um processo iterativo e tem quatro etapas fundamentais.

Primeiramente, aplica-se o stress em degraus, até ocorrer a primeira falha, atingindo-se o limite operacional, depois esta é analisada de modo a descobrir o mecanismo que a provocou, e por último é implementada uma acção correctiva provisória que fará o produto funcionar normalmente, esta falha, assim como todas as outras que aparecerem a seguir serão apontadas. Tanto o nível de stress a que ocorreu, como também o modo de falha, e o mecanismo de falha que a provocou. Seguidamente é novamente aumentado o stress de modo a encontrar a falha seguinte. Este processo repete-se até o teste ser parado. Ora este pode parar por diversos motivos. O primeiro é, naturalmente, porque os limites da câmara de testes foram atingidos. Outra razão pode ser ainda quando ocorre uma falha mas o custo de implementação de acção correctiva comparado com o valor do produto não é compensador. Também quando os limites destrutivos forem atingidos (pontos a partir dos quais mesmo que se remova o stress, o produto não recupera, foi destruído) ou ainda quando é atingido o nível fundamental da tecnologia, que é o ponto a partir do qual começam a ocorrer múltiplas falhas com pequenos aumentos de stress, e a análise de falhas revela que a correcção das mesmas é proibida ou impossível.

A figura 12 ilustra graficamente o ciclo do HALT.

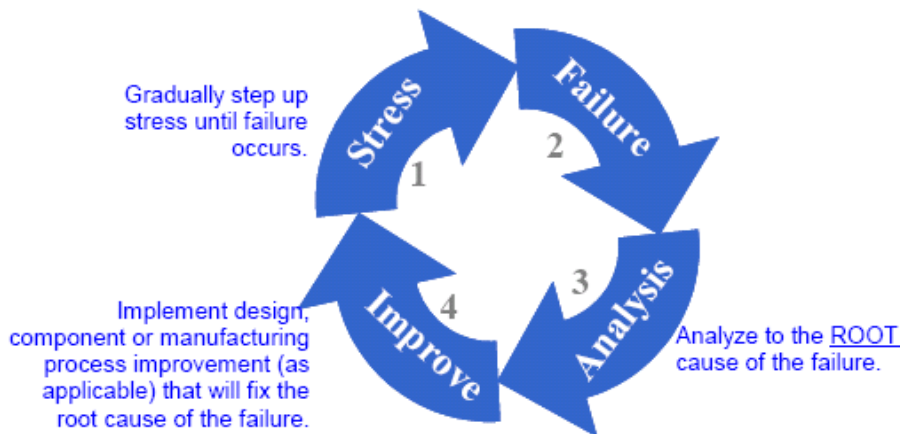


Figura 12 – Ciclo do HALT (Imagem retirada do artigo: "High Reliability Challenge of broad Band Equipment")

No final do HALT é feita uma lista de falhas encontradas e acções correctivas aplicadas que servirão de apoio para a definição e implementação de futuros testes. Deve, ainda, decidir-se quais as falhas serão corrigidas no protótipo. Assim, é considerado bem sucedido quando as falhas são induzidas, os modos de falha são compreendidos e acções correctivas são implementadas.

Através de uma correcta implementação do HALT a margem operacional do produto deve ser aumentada. A margem operacional também denominada de factor de segurança, não é mais que a diferença entre os limites das especificações operacionais do produto (intervalo no qual o produto funciona em condições normais) e os limites operacionais (LOL e UOL) que são os pontos a partir dos quais o produto começa a falhar, no entanto, se o stress for retirado o produto recupera e executa a sua função normalmente.

Os limites operacionais, assim como os destrutivos, têm sempre distribuições estatísticas. Na figura 13, esta surge como uma distribuição normal mas pode assumir outra forma (bi-modal, assimétrica). Estes limites serão o mais bem definidos quanto mais unidades forem testadas.

Então, depois do HALT o produto deverá ter aumentado a sua margem operacional. Sem o crescimento da margem as distribuições actuais das falhas próximas dos limites operacionais podem cair dentro dos limites das especificações do produto, resultando numa falha.

Com uma margem de operação mais ampla gerada pelo HALT, variações do processo produtivo e efeitos ambientais de campo têm mínimo impacto no desempenho do produto e sua fiabilidade.

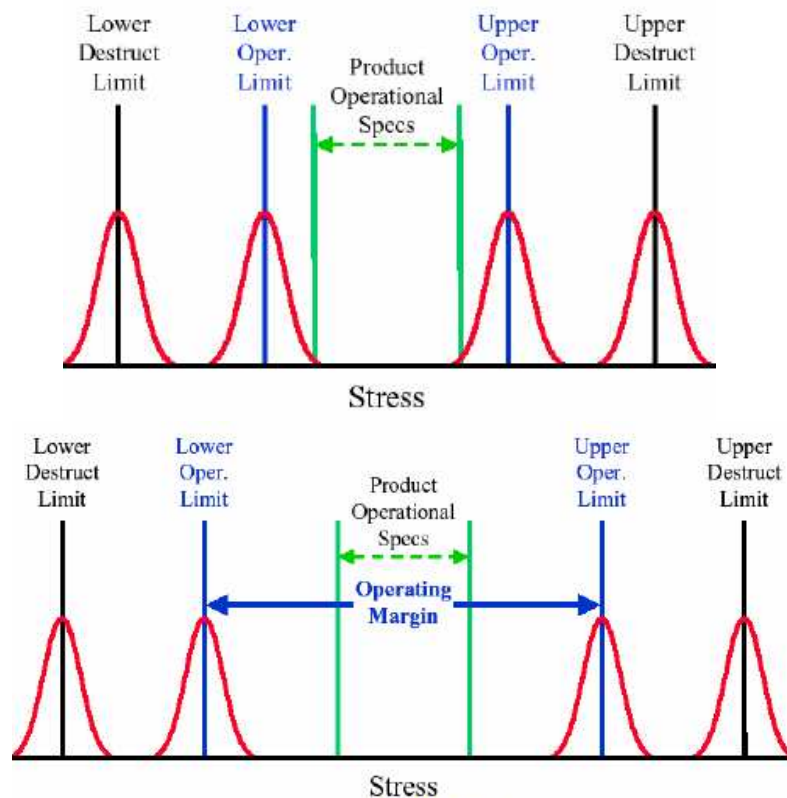


Figura 13 – Diagrama representativo do crescimento da margem antes e depois do HALT (Imagem retirada do artigo: "High Reliability Challenge of broad Band Equipment")

2.2.3.2 Vantagens

A meta é adquirir um nível máximo de margem entre os limites operacionais e as especificações do produto conseguindo desse modo aumentar a fiabilidade.

O produto quando chega à fase de produção já é maduro e não apresenta defeitos, logo há uma redução no re-trabalho, o que leva a um menor tempo desde o início do desenvolvimento do produto até ao seu lançamento no mercado.

Como as margens foram aumentadas e há uma maior resistência ao stress, raramente ocorrem falhas quando o produto opera em condições normais, o que faz a empresa poupar em termos de custos de serviço e de garantia e aumenta a satisfação e confiança dos clientes.

2.3.3.3 Desvantagens

Para a realização destes testes é necessário um grande investimento em equipamento.

Os ambientes de teste não estão directamente relacionados com os que vão ser utilizados na vida real e por isso pode gerar alguma controvérsia.

É difícil de executar para estruturas complexas e algumas falhas que são dependentes do tempo podem não ser expostas.

2.3.4 QALT

Quantitative Accelerated Life Testing (QALT) não é mais que uma variedade de testes utilizados para reduzir a vida de produtos ou provocar a degradação da sua performance rapidamente. O principal objectivo é obter rapidamente os tempos a serem analisados e desta forma produzir informações sobre a vida de um produto como, por exemplo, a probabilidade de falha do produto ou a sua vida média esperada sob condições de uso e o tempo médio entre falhas (MTBF).

Por outras palavras, a intenção deste método é determinar não somente que uma falha ocorrerá durante o tempo de vida esperado do produto mas, também, em que momento da sua vida, a falha aconteceria em condições normais de uso (Luciana Veloso de Luca, 2004).

Geralmente os modos de falha de interesse são conhecidos antes da realização do teste, nomeadamente através de informação obtida através do HALT ou de dados sobre a sua vida operacional, e há alguma informação que descreve a relação entre o mecanismo de falha e as variáveis de aceleração que podem ser usadas para identificar um modelo que pode ser usado para justificar a extrapolação entre o tempo de vida do produto sob condições aceleradas e sob condições normais.

Em análises de dados de vida, a chave é determinar através do uso de distribuições estatísticas, uma distribuição de vida que descreva o tempo para falha de um produto sob condições normais de operação. Ou seja, deseja-se determinar a função densidade de probabilidade ou *pdf* do tempo para falha sob as condições de uso.

Para alcançar esses resultados, é necessária a utilização de modelos que permitam fazer uma extrapolação dos dados obtidos na condição acelerada para chegar a uma estimativa das características de vida do produto sob condições normais de uso. Estes modelos podem variar desde uma situação trivial, com ampla base de dados, aplicação de stresses simples e constantes, distribuições de vida bem conhecidas, até uma tarefa quase impossível, com modelos extremamente complexos.

2.3.4.1 Métodos de Aceleração

As formas de aceleração podem ser divididas de acordo com dois tipos de variáveis de stress:

- Aceleração por aumento da taxa de uso: neste caso a variável de stress é o uso. Coloca-se o produto em operação, porém com uma taxa de uso maior que o normal. Sendo esta o número de vezes que o produto é utilizado ao longo de um intervalo de tempo. Note-se que neste teste o nível de stress é o mesmo a que o produto é sujeito em condições normais.
- Aceleração por altos níveis de stress: consiste em colocar o produto em uso a níveis altos das variáveis de stress com o objectivo de encurtar o tempo de vida ou degradar a performance do produto de maneira mais rápida. A maior dificuldade deste ensaio é extrapolar o resultado para a sua condição normal de uso, ou seja relacionar um dado tempo de ensaio com a vida esperada do produto. É preciso ter cuidado com a escolha dos tipos e níveis de stress para que não induzam modos de falha que nunca ocorreriam em condições normais.

Na aceleração por stress, deve ter-se em atenção à aplicação de stress. Diferentes tipos de aplicação podem ser considerados e a sua classificação pode ser feita de acordo com a dependência do stress em relação ao tempo. Sob este aspecto, existem dois esquemas possíveis: quando o stress é dependente do tempo e quando stress é independente do tempo. O tratamento matemático varia de acordo com a relação entre stress e tempo.

O tipo mais aplicado é os de stress independente do tempo. Isto acontece pois os testes de stress dependente do tempo, embora sejam mais eficazes em acelerar falhas, geram uma complexidade maior para o tratamento dos dados.

Um ponto importante a ser considerado no QALT é que a medida que os stresses se distanciam das condições normais de uso, a duração dos mesmos diminuem, porém, a incerteza na extrapolação aumenta. Intervalos de confiança devem ser definidos estabelecendo assim uma medida desta incerteza na extrapolação.

2.3.4.2 Factor de Aceleração

Pode definir-se como factor de aceleração a razão entre o tempo médio de vida até à falha em condições de uso normais e esse mesmo tempo medido em condições aceleradas. A sua fórmula é dada pela equação seguinte:

$$FA = \frac{MTTF_{uso}}{MTTF_{acelerado}}$$

Equação 3 – Factor de Aceleração

Visto que é esperado que a vida de um produto seja mais curta em condição acelerada, este factor deveria ser maior que 1. Se não é, pode-se concluir que as condições de stress elevado aplicadas não aceleraram qualquer mecanismo de falha (Ireson, W. Grant; Coombs Jr., Clyde F., 1996).

A pré-definição do factor de aceleração só é possível caso haja um modelo físico que permita descrever a variação do tempo de vida do produto em função do stress aplicado. Caso contrário, este só poderá ser obtido após a execução de alguns ensaios, com diferentes níveis de aceleração que permitam a definição de uma relação específica para o cálculo do factor de aceleração.

2.3.4.3 Extrapolação de dados

É necessário definir uma relação que permita a extrapolação dos resultados obtidos experimentalmente, na condição acelerada, para que se obtenha uma estimativa dos resultados em condições normais.

Para alguns mecanismos de falha, especificamente os mais verificados, já existem modelos matemáticos, que permitem a obtenção de dados relativos à vida do produto em condições normais de uso, como o MTTF e a sua distribuição de vida. Como por exemplo o modelo de Arrhenius, que representa o efeito da temperatura sobre um fenómeno químico. No entanto para se estimar os parâmetros da sua equação era necessário recorrer ao método da máxima verosimilhança, e isso implicava um esforço matemático muito grande, então, para simplificar já existem no mercado algumas aplicações de software, nomeadamente o ALTA7, que obtém automaticamente estes dados, bastando apenas ao utilizador a inserção dos tempos obtidos no teste.

No entanto, há mecanismos de falha para os quais ainda não há modelos matemáticos desenvolvidos e então a partir de resultados experimentais é necessário definir relações empíricas que expressem a variação da fiabilidade e do MTTF em função da aceleração de uma variável.

A definição dos valores de interesse para a condição normal de uso é baseada na realização de testes com grupos de produtos sendo que cada grupo é submetido a uma dada condição acelerada. Estes testes, não são censurados, ou seja, observa-se o tempo de falha de todos os elementos da amostra.

2.3.4.4 Procedimentos de Análise

O procedimento de análise, para testes onde não se conhece a lei que rege a aceleração do fenómeno físico associado a um dado modo de falha, deve ser baseado na utilização de diversas condições aceleradas de teste. Com esses testes obtém-se os tempos até à falha e então é determinada a distribuição de probabilidade que melhor se adapta aos dados. Consequentemente constrói-se as funções de densidade de probabilidade para cada uma das condições aceleradas.

A partir das distribuições podem ser determinados os tempos para que o produto atinja determinados níveis de confiança nas diversas condições aceleradas. A figura seguinte apresenta níveis de confiança para 5%, 95% e 50%.

Determina-se então as funções matemáticas que melhor se adaptam aos correspondentes níveis de confiança das diversas condições aceleradas. Estas funções são utilizadas para a determinação dos mesmos níveis de confiança nas condições normais de uso.

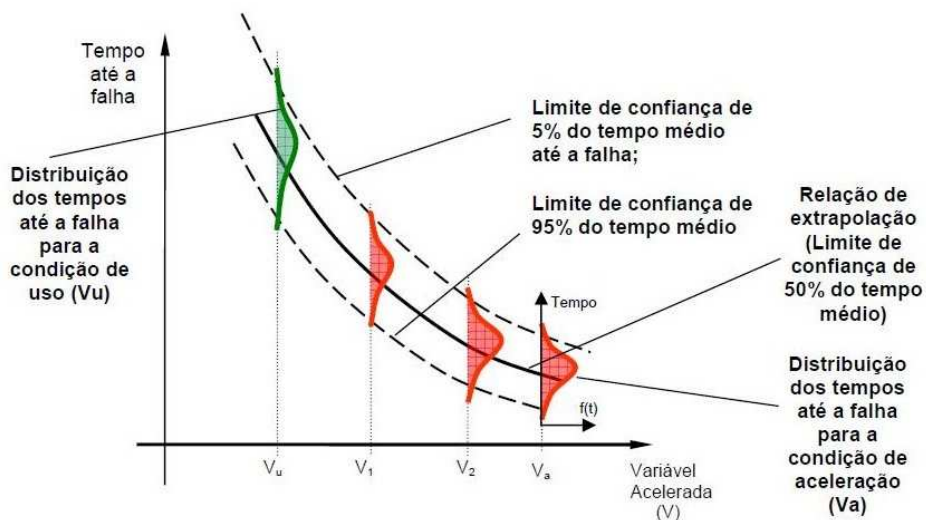


Gráfico 3 – Procedimento da análise para o QALT (Imagem retirada do livro “Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos”, Souza 2003)

Souza (2003) fornece algumas linhas orientadoras no que concerne ao uso de modelos de aceleração, entre elas a investigação de tentativas anteriores para acelerar modos de falha similares àquele de interesse. Também o uso de teoria física para a lei de extrapolação tanto quanto possível e claro, o stress aplicado deve causar falhar em condições de uso normais.

Alerta ainda para o facto de testes com um nível de acelerado muito alto podem causar modos de falha que não apareceriam em condições normais de uso. E caso exista mais de que um modo de falha, é normal que diferentes modos de falha sejam acelerados a diferentes taxas e, a menos que isto seja explicável podem levar a interpretações incorrectas dos resultados dos ensaios.

2.3.4.5 Vantagens

O aumento de stress garante o aparecimento de um maior número de falhas, conseguindo também reduzir o tempo do teste.

2.3.4.6 Desvantagens

É necessário saber qual é a relação entre o stress e o tempo de vida, e é necessário um grande número de unidades de teste para que o nível de confiança seja elevado.

O modelo deve ter em conta o efeito da acumulação de stress.

2.3.5 HASS

Uma vez que através da aplicação do HALT a fiabilidade do produto foi melhorada, é natural que o passo seguinte seja monitorizar o processo de produção para verificar que novos defeitos não apareceram. Neste sentido, surge o *Highly Accelerated Stress Screen* (HASS) que faz uma triagem dos produtos quando estes são produzidos e verifica se o processo produtivo não desenvolveu novos defeitos.

O Dr. Gregg Hobbs refere que: “no HASS, os testes são aplicados na produção de modo a diminuir o tempo de falha de unidades defeituosas e, conseqüentemente, acções correctivas mais rápidas que fazem diminuir o número de unidades com o mesmo tipo de defeito.”

Assim o HASS é desenvolvido com base no HALT. Durante o seu desenvolvimento, os tipos de stress são escolhidos incluindo amplitudes, sequências, e tempos de *dwell* usando os limites descobertos no HALT. Por esta razão, é essencial realizar um HALT completo antes do desenvolvimento do *screen* para descobrir e perceber as margens do design do produto. No entanto como este não é um teste destrutivo os níveis atingidos pelos stresses serão menores que no HALT.

Se os parâmetros de stress usados fossem baseados apenas em informações relativas às especificações do produto. A possibilidade de um *screen* apenas efectuado com base nestas informações seria muito arriscado porque o *screen* poderia ser extremamente ineficaz, ou no outro extremo o *screen* poderia remover uma parte significativa da vida do produto resultante num prematuro encontro do período de desgaste.

2.3.5.1 O processo do HASS

HALT ajuda a identificar os stresses ou combinações de stresses, que mais eficazmente forçam os pontos fracos e se manifestam em falhas detectáveis. Esta informação, juntamente com o conhecimento dos limites operacionais e destrutivos (também determinados no HALT), fornece toda a informação que é necessária para que seja feito um correcto *screen* à produção, que idealmente deveria ser realizado a todas as unidades produzidas.

O processo do HASS não só identifica falhas de mortalidade infantil, mas também precipita defeitos latentes e identifica defeitos do processo produtivo. É ainda necessário

perceber que todos os *screens* removem vida do produto, e assim de modo a validar o perfil do HASS antes da sua implementação é necessário executar o *proof-of-screen*.

O *Proof-of-Screen* um processo que tem dois objectivos distintos. O primeiro é determinar o quanto o *screen* do HASS é eficaz na detecção de defeitos de produção, ou seja demonstrar que o HASS detecta as falhas e o outro é provar que este não remove uma parte significativa da vida do produto.

Para tal são escolhidas amostras aleatórias da produção e que não passaram pelo HALT ou qualquer outro tipo de teste. Estas unidades são sujeitas entre 30 a 50 mais ciclos que aqueles que foram definidos para o perfil do HASS. Por exemplo se o número de ciclos do HASS é 3, têm de ser corridos 90 a 150 ciclos.

A maioria das unidades deve passar o teste, e as que apresentem falhas devem ser investigadas.

As repetições múltiplas do screen devem demonstrar que este não remove uma parte da vida significativa do produto. Idealmente, bons produtos irão tolerar entre 20 a 50 ciclos sem exibir falhas de fim de vida.

Uma boa estimativa sobre a quantidade de vida removida do produto pode ser feita comparando o número de ciclos no screen de produção com o número de ciclos necessários para causar falhas do fim de vida. Por exemplo se foram corridos 30 ciclos no *proof-of-screen* e não houve nenhuma falha de fim de vida e se o HASS consiste em três ciclos. Isto significa que o screen removerá menos de 3/30 ou 10% da vida do produto.

Só então é realizado o HASS e este é um processo que passa por seis etapas fundamentais: Precipitação, Detecção, Análise da Falhas, Acção Correctiva, Verificação e Documentação da Experiência.

Precipitação que tem como objectivo principal converter defeitos latentes em falhas detectáveis em produtos defeituosos. Os níveis de stress aplicados são superiores aos limites operacionais, mas abaixo dos limites destrutivos encontrados no HALT. Sendo assim, o produto não consegue desempenhar a sua função por isso não pode ser testado funcionalmente durante a precipitação.

Detecção significa observar de alguma maneira se alguma anomalia existe, seja electricamente, visualmente, ou por qualquer outro meio.

A detecção usa níveis de stress menores que a precipitação e o seu objectivo é detectar as falhas que foram induzidas durante a precipitação. Há muitos defeitos latentes não são detectados sob condições normais por isso os limites de detecção são superiores às especificações operacionais e menores que os limites operacionais de modo a que se teste funcionalmente os produtos e falhas sejam descobertas.

A comparação entre estes dois *screens* é visualizada graficamente na figura seguinte (figura 14):

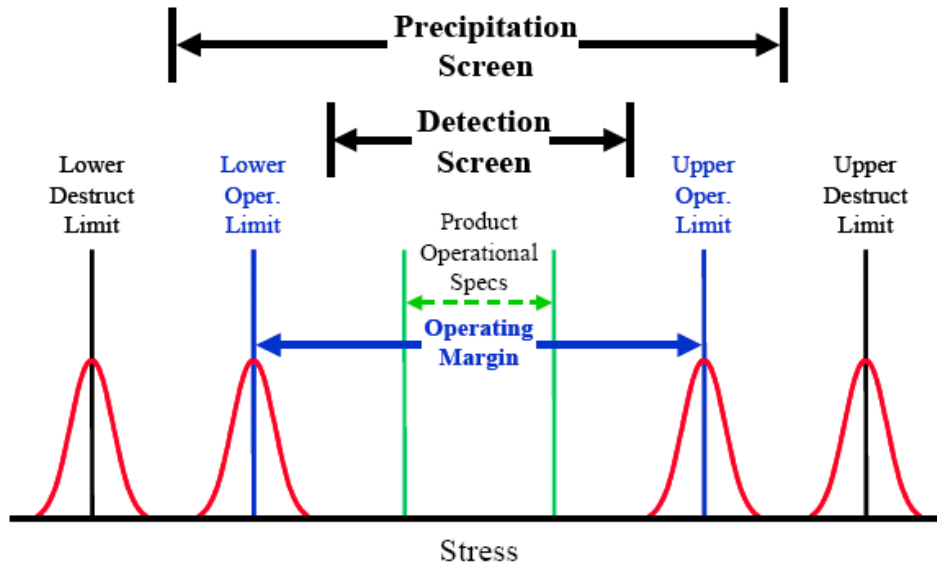


Figura 14 – Screens de Precipitação e de Detecção do HASS (Imagem retirada do artigo: “High Reliability Challenge of broad Band Equipment”)

Análise de falhas significa determinar a origem da falha. O objectivo é determinar onde no processo produtivo e porquê que o produto falhou.

Acção Correctiva constitui a alteração que é feita no sentido de eliminar a causa do defeito na produção futura.

Verificação implica a verificação de que a acção correctiva tomada efectivamente resolveu o problema. E é feita repetindo as condições as condições que causaram o problema anterior.

Documentação da Experiência que inclui recolha de dados do HASS em termos de que falhas eram e que acções correctivas foram implementadas. Este último passo é extremamente importante, pois sem ele, erros continuarão a ocorrer ao longo dos anos.

Deve notar-se que, à medida que são feitas mudanças no produto ou processo produtivo, o perfil do HASS deve também ser alterado, resultando na melhoria contínua do processo de *screening* e na optimização da fiabilidade do produto.

A figura 15 representa esquematicamente o ciclo do HASS

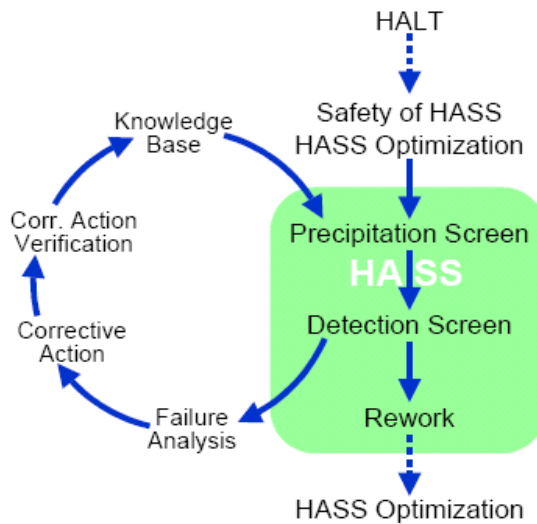


Figura 15 – Diagrama do processo do HASS (Imagem retirada do artigo: "High Reliability Challenge of broad Band Equipment")

2.3.5.2 Vantagens

HASS é muito mais eficaz que os métodos tradicionais de *screening*, como o *burn-in*. Além de detectar mais defeitos é muito menos moroso, demorando cerca de três horas enquanto o outro demora quarenta e oito horas. Assim, obtém-se rápido feedback dos problemas que ocorreram durante o processo produtivo o que permite uma rápida implementação de acções correctivas.

Este método ainda consegue detectar as falhas que aconteceriam durante a fase de mortalidade infantil e assim o produto quando entregue, já está na fase de maturidade quando a fiabilidade é máxima e assim os custos de garantia baixam significativamente.

2.3.5.3 Desvantagens

Para que se possa realizar estes testes é necessário, antes executar o HALT. Ainda a subjectividade em determinar os limites torna o processo difícil de se tornar eficaz.

E há ainda a possibilidade de reduzir significativamente a vida do produto se os stresses forem muito elevados.

2.3.6 Impacto na Fiabilidade de HALT e HASS

Aparentemente, o maior benefício do HALT e do HASS é minimizar as falhas que ocorrerão quando o produto estiver operacional. Sabe-se que o HALT também minimiza o tempo até este chegar ao mercado com a fiabilidade otimizada. A figura seguinte mostra o efeito do HALT e do HASS na fiabilidade do produto. Com a adição do HALT, a taxa de falhas pode ser reduzida e com o HASS, as falhas de mortalidade infantil podem ser detectadas e deste modo o produto chegará ao consumidor no ponto em que a sua fiabilidade é máxima.(Figura16).

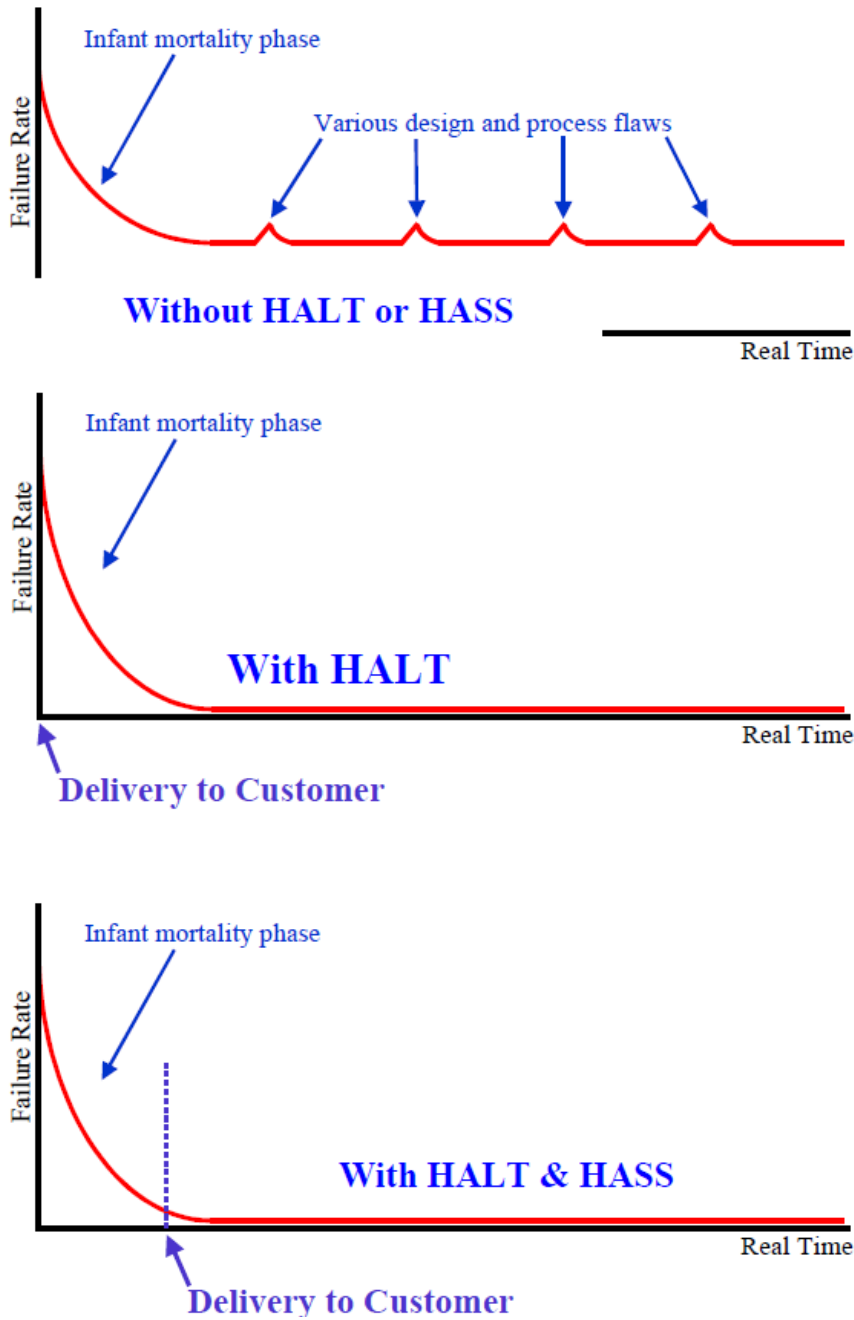


Figura 16 – Efeitos do HALT e do HASS na fiabilidade

3 Definição dos testes de vida acelerados

Sendo a definição de testes e a sua posterior implementação o principal propósito deste projecto, passar-se-á à apresentação dos mesmos neste capítulo.

Como foi referido no capítulo anterior, esta metodologia deverá ser aplicada ainda na fase de desenvolvimento do produto. Neste sentido, foi definido que estes testes seriam aplicados a um novo equipamento termodoméstico que se encontra ainda na fase de desenvolvimento e que por razões de confidencialidade será referenciado como produto X.

Também, no mesmo capítulo, foi referenciado que a maioria dos produtos é um sistema complexo constituído por diversos componentes que são sensíveis a stresses diferentes e que, por isso mesmo, apresentam mecanismos de falha diferentes. Ora, este facto tornaria a análise de falhas extremamente complexa, senão mesmo impossível. Por isso, o mais comum é escolher alguns componentes de um produto e analisá-los individualmente, no caso concreto deste projecto foi escolhida uma válvula.

Assim, antes da apresentação da proposta para a implementação de testes para cada uma das metodologias abordadas é necessário definir e descrever o componente a ser testado.

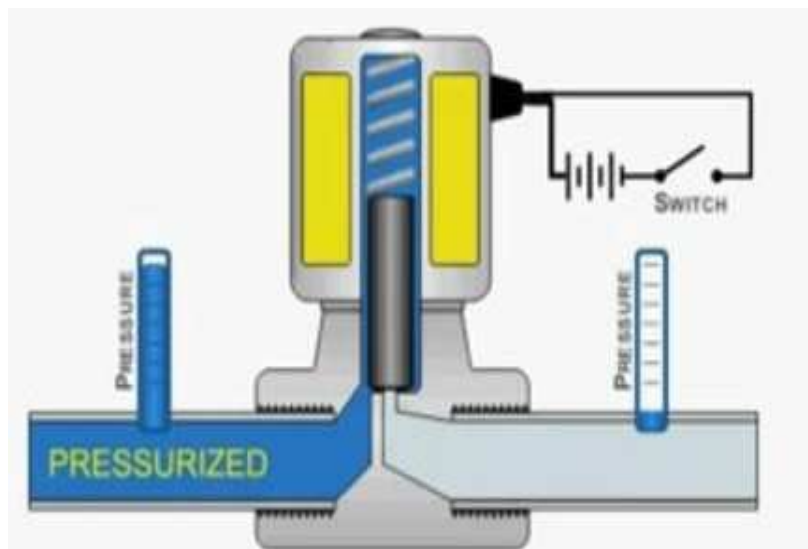
3.1 Descrição da Válvula

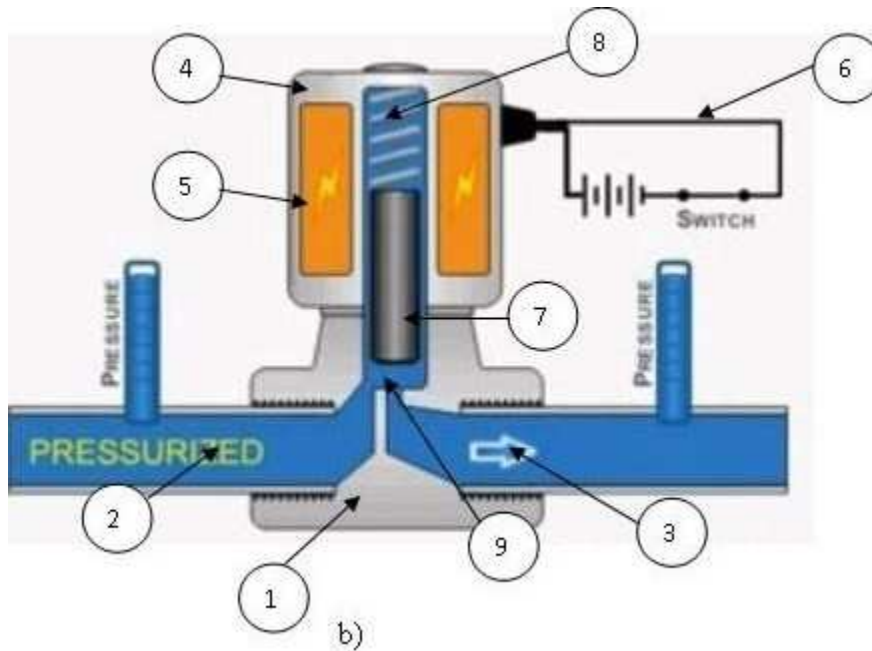
Depois de uma análise cuidadosa do produto X, concluiu-se que um dos seus componentes críticos é válvula ON/OFF. Esta é um componente não redundante e que, por isso, se falhar todo o sistema falha.

A função principal da válvula é controlar a passagem da água através do produto.

Mais concretamente, a válvula utilizada neste aparelho é uma válvula solenóide com apenas uma entrada e uma saída, de controlo directo, e que opera tanto a alta como baixa temperatura.

As figuras seguintes são uma representação esquemática de uma válvula solenóide desligada (figura 17a) e em funcionamento (figura 17b).





- | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 1. Corpo da Válvula | 2. <i>Inlet Port</i> | 3. <i>Outlet Port</i> |
| 4. Bobina | 5. Enrolamentos | 6. Fios metálicos |
| 7. Êmbolo | 8. Mola | 9. Orifício |

**Figura 17 – Esquema da válvula e seus constituintes a) Desligada b) Ligada
(Imagem retirada do site www.solenoide-valve-info.com)**

A válvula é controlada pela corrente eléctrica, que passa através do *bobina* (parte 4, na figura de cima). Quando a corrente percorre a bobina, o campo magnético é criado e as linhas de fluxo magnético transformam o êmbolo (7) num íman. O campo magnético causa a subida do êmbolo e deste modo o orifício (9) é aberto Assim, a água passa da *inlet port* (2) para a *outlet port* (3). Quando a corrente eléctrica é removida o campo magnético desaparece e o êmbolo desce fechando assim a válvula.

A válvula usa ainda uma mola (8) que pressiona o êmbolo contra o orifício de abertura impedindo assim a passagem da água, até que seja criado o campo magnético que o faça subir.

Quando a válvula está prestes a abrir, a força da mola ajuda a manter o orifício fechado.

Contudo assim que a válvula é aberta e a água começa a passar, a força hidráulica diminui dramaticamente. Então uma válvula solenóide ideal deve ter apenas força para conter a tensão e a força hidráulica. Mas uma vez que a válvula abre a força hidráulica diminui e a válvula só precisa de consumir energia suficiente para comprimir a mola.

A bobina não é mais que um fio metálico condutor enrolado várias vezes, apresentando uma forma cilíndrica. Cada uma das voltas do fio metálico é uma espira.

Aplicando uma corrente eléctrica neste fio condutor ele irá gerar um campo magnético ao seu redor e no seu interior. O campo magnético no interior é uniforme e as linhas do campo são paralelas ao seu eixo. O campo magnético é bastante semelhante ao campo de um ímã em forma de barra, onde a extremidade por onde saem as linhas de campo é o pólo norte, e a extremidade por onde entram as linhas de campo é o pólo sul.

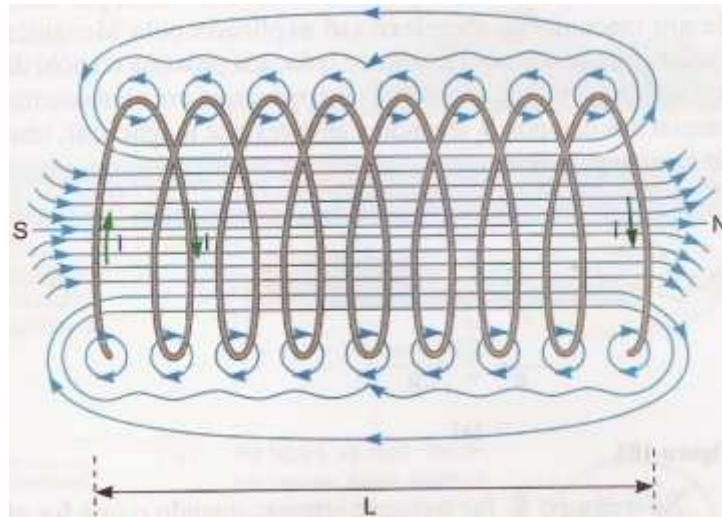


Figura 18 – Campo Magnético criado pelo coil (Imagem retirada do site <http://www.ndt-ed.org>)

Estabelecendo-se uma corrente, essa corrente cria um campo magnético no interior da bobina. O seu valor, ao longo do eixo central, depende da intensidade da corrente eléctrica (I), do número de espiras (N) e da indutância (L). A intensidade do campo magnético para solenóides, como é o caso da bobina, é dada pela seguinte equação:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} . I$$

Equação 4 – Intensidade do Campo Magnético para bobinas

Sendo assim o êmbolo acelera à medida que o circuito magnético se torna mais eficiente.

3.2 Definição dos Stresses

Depois do estudo da válvula foi necessário escolher os stresses que poderiam provocar falhas. Anton H. Hehn, e Stephen Glaudel afirmam que muitas válvulas falham porque a bobina queima. Este facto sucede devido ao seu sobreaquecimento.

Procedeu-se, então ao estudo para descobrir os stresses que poderiam causar este sobreaquecimento.

Naturalmente, o primeiro factor é a temperatura. Se a temperatura ambiente for muito alta a bobina perde a capacidade de dissipar calor e por isso aquece.

Existe mesmo uma regra denominada de “*ten degree C*” que sugere que a vida da bobina duplica por cada 10 graus de redução da temperatura operacional mantendo o resto *ceteris paribus*, (Stephen Glaudel).

Sabe-se também que a potência instantânea é dada pela fórmula:

$$P(t) = R.i^2(t)$$

Equação 5 – Potência Instantânea

Isto implica que o aumento da corrente vai fazer aumentar a potência, que vai começar a ser dissipada sob a forma de calor pelo efeito de Joule e isto vai contribuir para o sobreaquecimento da bobina.

Pode-se, então afirmar que o aumento da intensidade da corrente, contribui para que a válvula falhe.

O aumento da corrente pode ser obtido de duas formas diferentes. Atente-se a lei de Ohm para a corrente alternada:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Equação 6 – Lei de Ohm para corrente alternada

Onde V é Tensão, L é Indutância e di/dt é a variação da intensidade em função do tempo.

Observa-se que a tensão e a intensidade da corrente são directamente proporcionais. Então, aumentando a tensão e mantendo as outras variáveis – L e dt – constantes, obtém-se o aumento da corrente.

Assim, o aumento da tensão é outro dos stresses que provoca o sobreaquecimento da bobina.

É importante também referir que o aumento de tensão, além de sobreaquecimento, gera vibrações que por sua vez provocam desgaste mecânico e ruídos. (Baccarini *et al*, 2001).

A forma de onda de corrente e tensão em Corrente Alternada pode ser descrita matematicamente na fórmula:

$$a(t) = A \cdot \sin(2\pi ft + \phi)$$

Equação 7 – Forma de onda da corrente

onde

$a(t)$ é a função (tensão ou corrente) no domínio do tempo,

A é a amplitude ou valor máximo (também chamado de *valor de pico*),

f é a frequência em hertz.,

t é o tempo em segundos,

ϕ é o ângulo de fase, em graus.

Logo a corrente pode ser descrita como:

$$i(t) = I \cdot \sin(2\pi ft + \phi)$$

Equação 8 – Corrente em função da frequência

Assim, quanto menor a frequência, maior será o fluxo de corrente na bobina.

Depois de definidos os stresses a que a válvula vai ser sujeita – temperatura, tensão e frequência – são definidos os testes que vão ser implementados.

3.3 Proposta de Metodologia

3.3.1 HALT

Como se referiu anteriormente o primeiro dos testes a ser realizado será o HALT e servirá de base para a definição dos outros.

Em cada teste serão utilizadas 4 válvulas.

3.3.1.1 Tensão

O primeiro teste a ser realizado será o de tensão, denominado *Voltage step stress*, neste caso optou-se apenas pelo incremento de tensão. O teste da diminuição da tensão não causará nenhum efeito, visto que, ao diminuí-la, a corrente diminui também, sendo assim, o campo magnético criado será muito fraco, e a única consequência disso será a não abertura da válvula.

De modo a monitorizar o aquecimento da bobina, em cada *step* será medida a resistência de cada uma das válvulas testadas. A norma NP EN 60335-1, de 2005 refere que “os aquecimentos dos enrolamentos são determinados pelo método de variação da resistência”.

O valor da elevação da temperatura de um enrolamento pode ser calculado a partir da fórmula presente na norma acima referida:

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (k + t_1) - (t_2 - t_1)$$

Equação 9 – Fórmula do aquecimento do Coil

Onde:

Δt é o aquecimento da bobina

R_1 é a resistência no início do teste

R_2 é a resistência no final do teste

K é igual a 234,5 para bobinas de cobre e 225 para bobinas de alumínio;

T_1 a temperatura ambiente no início do teste

T_2 é a temperatura ambiente no final do teste

É ainda recomendado que no início de teste a bobina esteja à temperatura ambiente. As medições da resistência devem ser feitas o mais rápido possível após a abertura do circuito e, a partir daí, em intervalos curtos, de modo a poder traçar-se uma curva de variação da resistência em função do tempo para determinar a resistência no momento de abertura do circuito.

O teste realiza-se à temperatura ambiente e com uma frequência de 50Hz.

- a) Inicia-se o teste à tensão nominal de 230 V.
- b) Mantém-se a tensão constante durante 5 minutos.
- c) Mede-se a resistência e faz-se inspeção visual.
- d) Aumenta-se a tensão em 10 V.
- e) Repetem-se os passos b, c d consecutivamente até o limite superior operacional (UOL) e o limite superior destrutivo (UDL) sejam encontrados

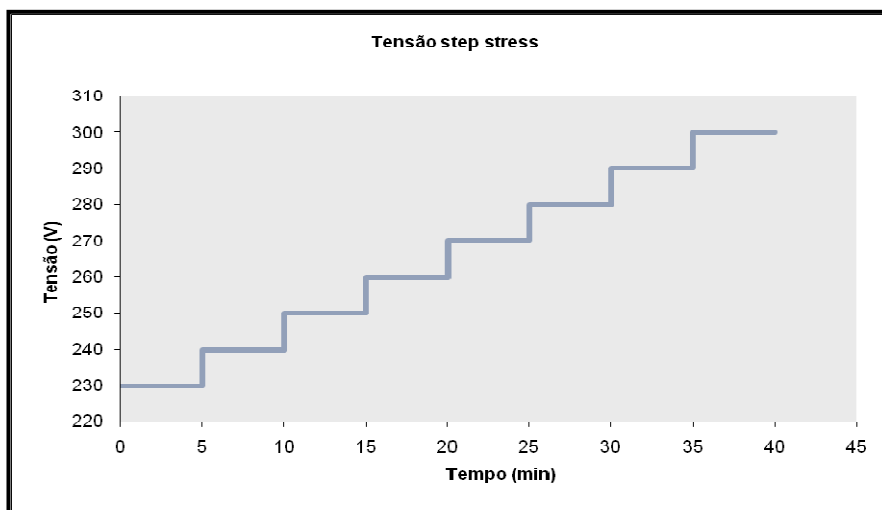


Gráfico 4 – Perfil de Tensão Step Stress

3.3.1.2 Frequência

No caso da frequência apenas se irá realizar o *step* stress de diminuição desta. Já que o seu aumento teria um efeito similar à diminuição da tensão. Ou seja, ao aumentar a frequência, a corrente diminui, e assim, o campo magnético criado é incapaz de abrir a válvula.

Segundo as especificações do fornecedor a válvula é definida para operar com uma frequência entre 50 a 60 Hz.

Este teste tal como o descrito anteriormente também será realizado à temperatura ambiente com uma tensão de 230V e também se calculará o aquecimento da bobina.

- a) Inicia-se o teste com 60Hz de frequência.
- b) Mantém-se esta frequência constante durante 30 minutos.
- c) Mede-se a resistência e faz-se inspeção visual.
- d) Diminui-se a frequência 10 Hz, ou seja para 50 Hz, já que se espera que a válvula trabalhe normalmente a essa frequência.
- e) Mantém-se esta frequência constante durante 30 minutos.
- f) Mede-se a resistência e faz-se inspeção visual
- g) Reduz-se a frequência 1Hz
- h) Repetem-se os passos e, f, g consecutivamente até o limite inferior operacional (LOL) e o limite inferior destrutivo (LDL) sejam encontrados

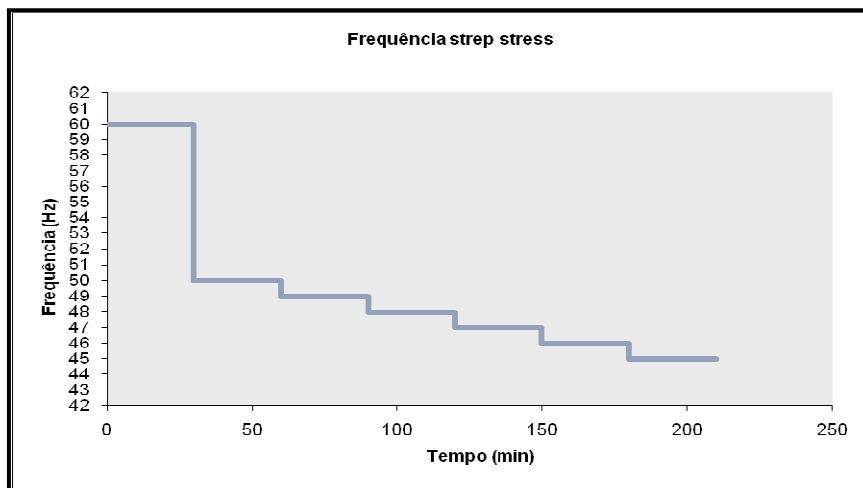


Gráfico 5 – Perfil de Frequência *Step* Stress

3.3.1.3 Temperatura

O último stress a que a válvula será testada é a temperatura. Este stress envolve três testes diferentes. O *Cold Step* Stress que será o primeiro a ser realizado por ser o menos destrutivo dos três, seguidamente, executa-se o *Hot Step* Stress, e por fim o choque térmico que na definição do seu perfil utilizará os limites encontrados nos dois testes realizados anteriormente.

Na realização dos testes cujo stress é a temperatura, estes são realizados com a válvula desligada da corrente sendo apenas ligada aquando da realização dos testes funcionais.

Os testes funcionais são executados com base nas condições definidas num documento interno da BOSCH designado por *Material Order Specification* – MOS. Este documento é redigido ainda na fase de concepção de cada componente e é criado com base nas características do componente, as características do equipamento a que se destina, bem como as indicações do e para o fornecedor e as necessidades do cliente final. Este documento leva em conta as normas que regulamentam a produção deste tipo de equipamentos, bem como as normas específicas de cada mercado a que o aparelho se destina.

3.3.1.3.1 Step Stress Térmico

- a) Coloca-se a válvula dentro da câmara climática e regulariza-se a temperatura a 20°C.
- b) Mantém-se a temperatura constante por um período de 10 minutos.
- c) Executam-se os testes funcionais.
- d) Faz-se uma diminuição/aumento da temperatura de 10°C.
- e) Mantém-se a temperatura constante durante 10 minutos.
- f) Executam-se os testes funcionais
- g) Repete-se os passos d, e, f consecutivamente até aparecer a primeira falha.
- h) Quando a primeira falha ocorrer deve-se aumentar/diminuir a temperatura até à temperatura ambiente, 20°C, e os testes funcionais são novamente executados. A temperatura a que ocorreu a primeira falha deve ser apontada e é classificada como o limite operacional inferior.
- i) Faz-se a análise de falhas e conseqüentemente deve ser corrigido o defeito da válvula.
- j) Este procedimento é repetido sucessivamente até que seja encontrado o limite destrutivo ou os limites da câmara climática sejam atingidos.

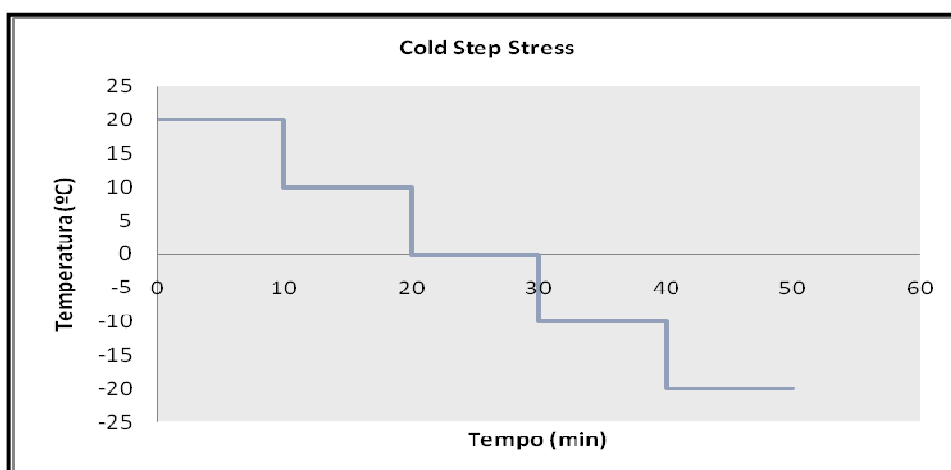


Gráfico 6 – Perfil do *Cold Step Stress*

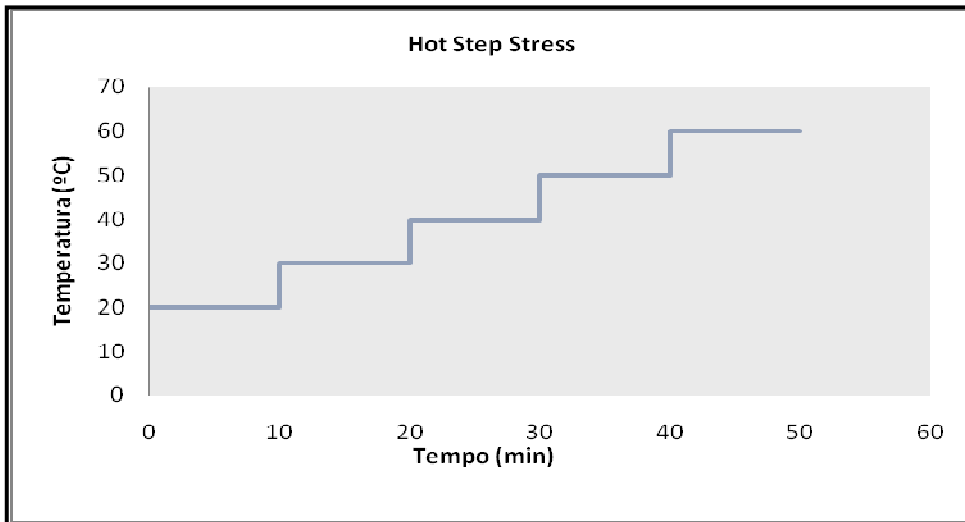


Gráfico 7 – Perfil do *Hot Step Stress*

3.3.1.3.2 Choque térmico

Este teste é o último passo para a avaliação do produto ao stress térmico.

Os extremos deste teste são obtidos com base nos testes realizados anteriormente. O extremo inferior será o limite operacional inferior (LOL), encontrado no teste do *cold step stress*, + 5 °C e o extremo superior será o limite operacional superior (UOL), encontrado no teste do *hot step stress*, - 5°C.

- a) Coloca-se a válvula dentro da câmara climática e regulariza-se a temperatura a 20°C.
- b) Desce-se a temperatura até ao extremo inferior à taxa máxima que a câmara permitir.
- c) Mantém-se a temperatura constante durante 10 minutos.
- d) Realizam-se os testes funcionais.
- e) Sobe-se a temperatura até ao extremo superior à taxa máxima que a câmara permitir.
- f) Mantém-se a temperatura constante durante 10 minutos
- g) Realizam-se os testes funcionais.
- h) Repete-se o passo b

Os passos descritos anteriormente dizem respeito a um ciclo e devem ser repetidos até se perfazer um total de 5 ciclos.

Assim que os 5 ciclos estejam completos deve-se retornar a câmara para a temperatura ambiente de modo a não haver degradação na sua performance.

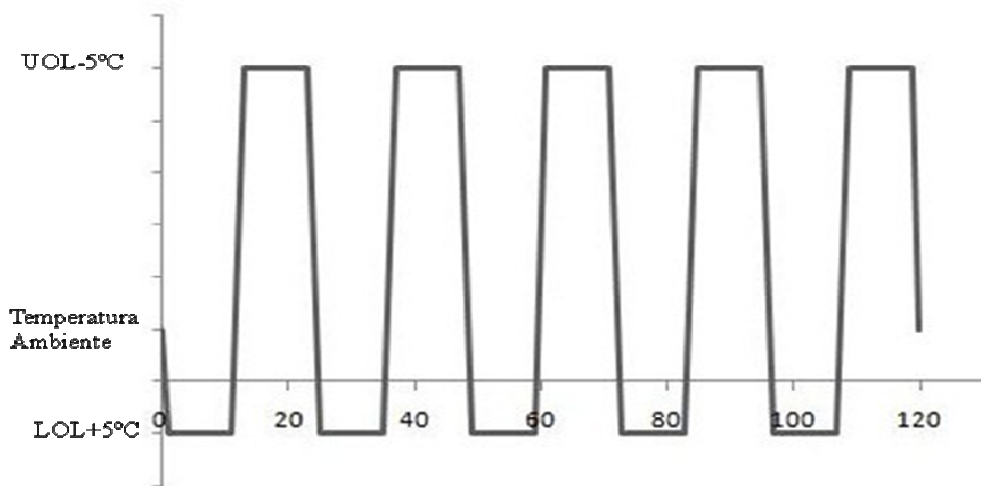


Gráfico 8 – Perfil do choque térmico

3.3.1.3.3 Proposta para gerir os limites do HALT

Durante o HALT vão ser descobertas falhas e aí surgem duas questões: quais delas devem ser corrigidas? E devem corrigir-se todas as falhas?

Assim, propõe-se uma solução para responder a estas questões.

Pressupostos assumidos:

Um desvio padrão de temperatura de 4°C e a falha pode ser caracterizada dentro de 4σ. Isto significa que se uma amostra de produtos apresenta o mesmo modo de falha, dentro de um intervalo de 16°C, caso ocorram falhas devido ao stress térmico, estas serão todas detectadas, em todas as unidades de teste. 4°C e 4σ derivam de informações retiradas da literatura.

Uso do processo

Para especificações térmicas é necessário adicionar 32°C ou (2x4x4σ) aos limites operacionais. O 2 é adicionado porque se considera que a distribuição assume a forma de uma distribuição normal.

Com os 4σ aplicado dos dois lados, assegura-se que não mais que +/-32ppm (0.0032%) dos defeitos irão escapar. Isto significa que 0.0032 produtos defeituosos por cada mil produzidos não serão descobertos com o processo HALT. Assim, pode assegurar-se que as especificações do produto serão cumpridas 99.9968% do tempo.

Na figura seguinte está representado um exemplo das temperaturas limite até às quais as falhas devem ou não ser corrigidas. Neste exemplo, o limite operacional inferior é 56°C e o limite operacional superior é 71°C.

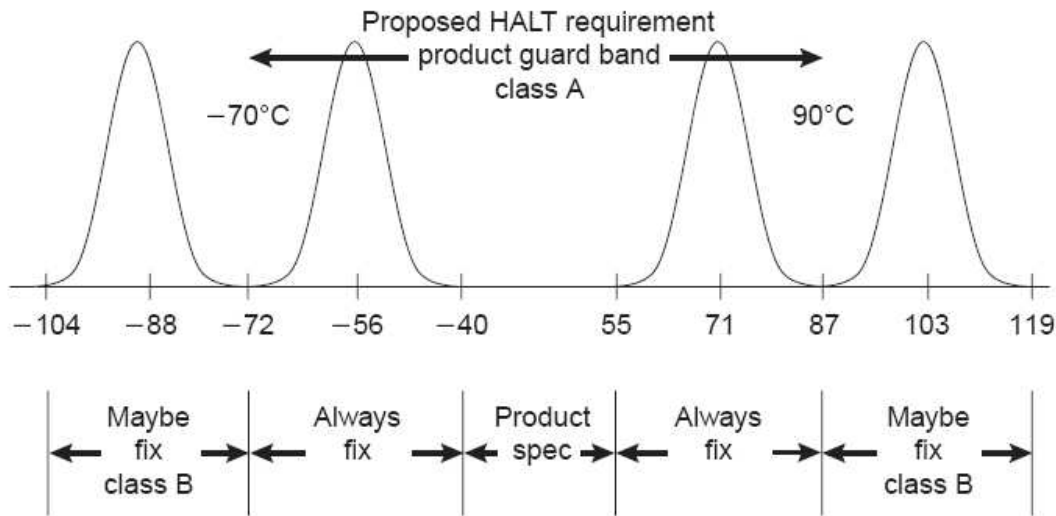


Figura 19 – Diagrama estatístico térmico.

3.4 QALT

Para a válvula considerar-se-á dois testes. O primeiro tendo a temperatura como stress e sendo ensaio de choque térmico. O outro teste será um teste de tensão *step stress*.

3.4.1 Choque Térmico

Para a execução deste teste devem ser utilizadas 20 unidades de teste.

O extremo superior do teste é obtido através de UOL-15°C e o extremo inferior através de LOL+15°C, sendo que o tempo em cada extremo será de 25 minutos e serão feitos 10 ciclos.

Aqui, é extremamente importante a monitorização do componente, por isso, estará em funcionamento durante o tempo de teste para se perceber exactamente quando falhou.

Assim que o componente falhar o seu teste acaba.

Devem ser apontados os tempos de todas as unidades que falharam.

Seguidamente é realizada a análise de dados e para isso é necessário definir uma temperatura média, já que esta é variável ao longo do teste. O seu valor é dado pela equação:

$$T_{m\u00e9dia} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T(t).dt}{t_2 - t_1}$$

Equação 10 – C\u00e1lculo da Temperatura m\u00e9dia de teste

Assim, a partir dos dados obtidos \u00e9 poss\u00edvel obter os valores do MTTF assim como o seu intervalo de confian\u00e7a. Para essa estimac\u00e3o deve ser assumido que a probabilidade de falha do sistema \u00e9 aleat\u00f3ria, utilizando a distribui\u00e7\u00e3o exponencial.

Há que ter em conta que nem todos os dados do ensaio falharam por isso este é um ensaio censurado.

Em seguida utilizando a equação de Arrhenius e do factor de aceleração consegue-se determinar o MTTF da válvula em condições normais:

$$t = A * e^{\left[-\frac{E_a}{kT} \right]}$$

Equação 11 – Equação de Arrhenius

$$FA = \frac{t_{uso}}{t_{teste}} = e^{\left[\left(\frac{E_a}{K} \right) \left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{teste}} \right) \right]}$$

Equação 12 – Factor de aceleração

Onde:

t – Tempo até à falha

T – Temperatura a que a amostra falhou

A – constante

Ea – Energia de Activação

K – constante de Boltzman (8,62*10⁻⁵ eV/K)

Tanto Ea como A, são estimados a partir dos dados obtidos experimentalmente. Vários autores, entre eles, Gisela Hartler apresentam modelos para a estimação destes parâmetros.

3.4.2 Tensão Step Stress

Para a execução deste teste também devem ser utilizadas 90 válvulas.

Este teste será realizado à temperatura ambiente e com uma frequência de 50Hz.

Quanto ao seu perfil, contará apenas com 3 níveis de stress, o primeiro nível será de 240Volts e as válvulas estarão sob esta tensão 5 horas (300 minutos). O terceiro nível será o limite destrutivo encontrado no teste de tensão *step* stress e este nível será mantido durante 2 horas (120 minutos). O nível intermédio terá um valor de tensão que será o valor médio entre o nível inferior e o nível superior. Este estado terá a duração de 3 horas (180 minutos), (Figura 20).

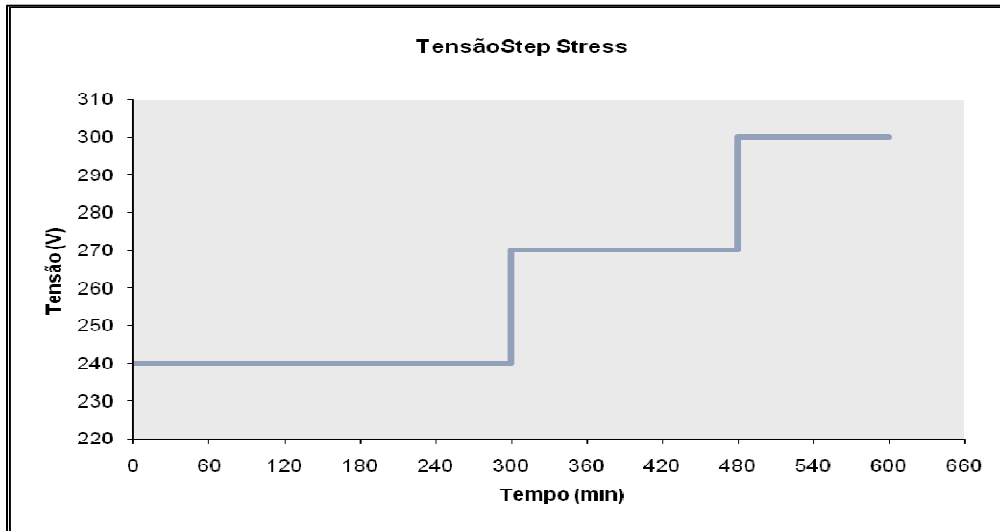


Gráfico 9 – Perfil do Tensão Step Stress

Após a obtenção dos tempos de falha será feita a análise dos dados pelo programa ALTA7, utilizando a distribuição de Weibull e o modelo da lei da Potência Inversa (equação 12), que permitirá determinar o tempo médio de vida das válvulas na condição normal de uso de tensão.

$$t = \frac{1}{kV^n}$$

Equação 13 – Lei da Potência Inversa

Onde:

t – Tempo até à falha

V – Tensão a que a amostra falhou

k, n – Constantes

3.5 HASS

Como as unidades a serem testadas no HASS já estão na fase de produção, devido ao tempo reduzido e ao número elevado de unidades, de preferência a toda a produção. Deve apenas fazer-se um tipo de teste. Neste caso, optou-se por fazer apenas o choque térmico.

Antes da realização do HASS será realizado o *proof-of-screen* que como se sabe tem como objectivos determinar se o perfil do HASS é suficientemente forte para encontrar defeitos e se deixa vida suficiente no produto.

O *proof-of-screen* terá o mesmo perfil que o HASS e serão feitos 90 ciclos a 4 unidades. Assim sendo o HASS roubará menos de 3,4% da vida do produto.

Quanto ao perfil do HASS este será dividido em duas partes:

Como explicado no capítulo anterior o HASS é dividido em duas fases:

Screen de Precipitação: para definir os extremos do teste será utilizada a seguinte “*rule of thumb*”:

$$T_{p1} = \frac{UDL + UOL}{2} \quad \text{a)}$$

$$T_{p2} = \frac{LDL + LOL}{2} \quad \text{b)}$$

Equação 14 – Extremos do *precipitation screen* a) superior b) inferior

Em que T_{p1} é o extremo superior do ciclo, e T_{p2} o extremo inferior.

Este teste deve ser feito em 3 ciclos, o componente deve ficar em cada extremo durante 5 minutos. Como neste caso não se espera que as unidades estejam a funcionar não são feitos testes funcionais.

Screen de Detecção: os extremos do teste são definidos pelas seguintes equações:

$$T_{d1} = UOL - 5 \quad \text{a)}$$

$$T_{d2} = LOL - 5 \quad \text{b)}$$

Equação 15 – Extremos do *detection screen* a) superior b) inferior

Em que T_{d1} é o extremo superior do ciclo, e T_{d2} o extremo inferior.

Devem ser feito 3 ciclos, e o componente deve ficar em cada extremo durante 5 minutos.

No final dos 5 minutos em cada extremo são realizados os testes funcionais, porque como os extremos estão abaixo dos limites operacionais, espera-se que as válvulas estejam operacionais.

4 Implementação de Testes e Resultados

No capítulo anterior foi feita uma descrição do componente analisado, os testes a serem realizados e as motivações de cada teste. Na presente secção de texto, serão apresentados os resultados obtidos depois de fazer uma referência ao que era esperado.

Neste capítulo apenas serão apresentados os resultados relativos aos testes definidos para o HALT e QALT. Quanto ao HASS, este tipo de testes é apenas aplicado quando os produtos já se encontram na fase de produção. Dado que este produto ainda está na fase de desenvolvimento não foi possível a aplicação do mesmo.

4.1 HALT

4.1.1 Amostras

De acordo com as características definidas no *MOS* foram tomadas em consideração dois tipos de válvulas de um mesmo fornecedor e que obedecem às características especificadas.

Assim as válvulas tipo “A” (figura 20) apresentam as seguintes características (tabela 2):

Tabela 2 – Características das válvulas tipo “A”

Tensão	220/240 Vac
Frequência	50 Hz
Resistência Ohmica da bobina	3000 +/- 10% Ω
Caudal	2,5 L/min

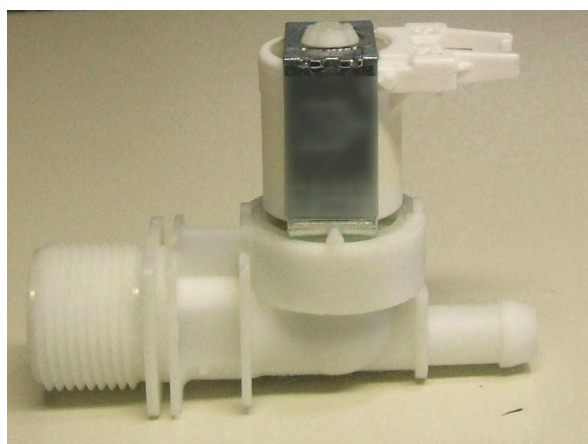


Figura 10 – Válvulas tipo “A”

Já as válvulas tipo “B” (figura 21) apresentam as seguintes características (tabela 3):

Tabela 3 – Características das válvulas tipo “B”

Tensão	220/240 Vac
Frequência	50 Hz
Resistência Ohmica da bobina	4000 +/- 10% Ω
Caudal	3,7 L/min



Figura 21 – Válvulas tipo “B”

Todas as unidades testadas foram numeradas para que fosse mais fácil a recolha dos dados. Foram usadas 4 unidades em cada teste e a próxima tabela (4) discrimina as válvulas que foram usadas em cada tipo de teste.

Tabela 4 – Designação das válvulas usadas em cada teste

Nr	Tipo	Teste
1	“A”	Tensão <i>Step Stress</i>
2	“A”	Tensão <i>Step Stress</i>
3	“A”	Tensão <i>Step Stress</i>
4	“A”	Tensão <i>Step Stress</i>
5	“A”	Frequência <i>Step Stress</i>
6	“A”	Frequência <i>Step Stress</i>
7	“A”	Frequência <i>Step Stress</i>
8	“A”	Frequência <i>Step Stress</i>
9	“A”	Teste de Stress Combinado
10	“A”	Teste de Stress Combinado

11	“B”	Teste de Stress Combinado
12	“B”	Teste de Stress Combinado

4.1.2 Tensão *Step* Stress

Este foi o primeiro teste a ser realizado. Foram escolhidas 4 válvulas e foi aplicado o teste conforme descrito no capítulo anterior. No final de cada *step* foi medida a resistência em cada uma das válvulas.

Os gráficos 11 e 12 apresentam os valores do aquecimento da bobina em função da tensão fornecida e da resistência medida, respectivamente.

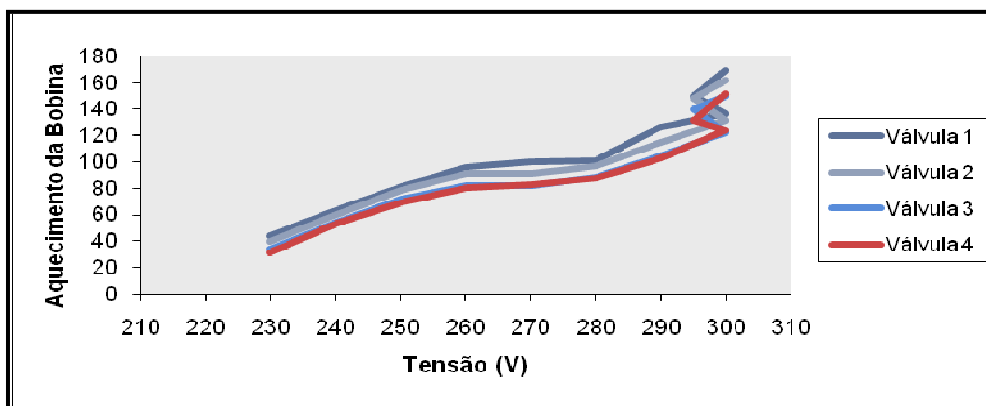


Gráfico 11 – Aquecimento da Bobina em função da Tensão

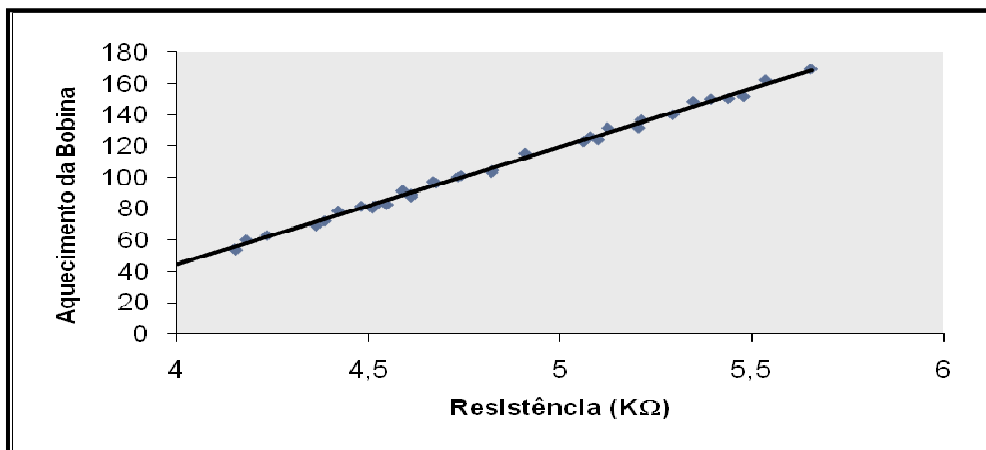


Gráfico 12 – Aquecimento da Bobina em função da Resistência

Quando se atingiu a tensão máxima que a fonte de alimentação poderia fornecer, mais concretamente 300 Volts, ainda nenhuma válvula tinha falhado, assim foi decidido manter essa tensão por um período de 1 hora e 15 minutos, mas mesmo depois desse tempo todas as válvulas continuavam a funcionar.

Assim, verificou-se que as válvulas eram robustas no que diz respeito à tensão elevada e mantendo as outras potenciais variáveis de stress em condições normais.

É importante ainda referir que a partir dos 240 Volts as válvulas começaram a fazer ruído e vibração, aumentando estes com o aumento da Tensão.

As medições efectuadas neste teste podem ser consultadas na tabela que se encontra no Anexo B.

4.1.3 Frequência Step Stress

O teste seguinte a ser realizado foi o de frequência. Para tal foram utilizadas 4 novas válvulas e executou-se as etapas conforme descritas no capítulo anterior.

Tal como no teste anterior, após cada *step* mediu-se a resistência a cada uma das válvulas, para determinar o aquecimento da bobina. Os gráficos seguintes exibem a relação entre o decréscimo da frequência e o aumento do aquecimento da bobina (gráfico 13) e os valores da resistência com o aquecimento da bobina (gráfico 14).

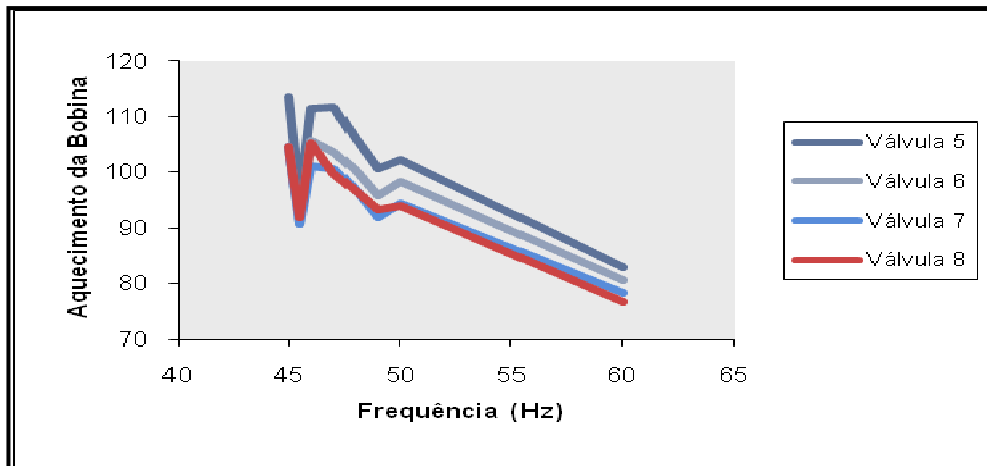


Gráfico 13 – Aquecimento da Bobina em função da Frequência

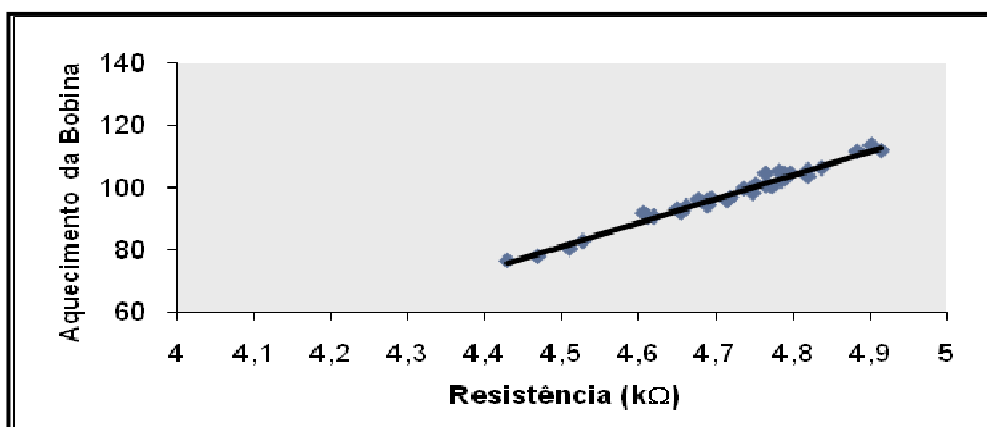


Gráfico 14 – Aquecimento da Bobina em função da Resistência

Assim, como o limite mínimo da fonte de alimentação é de apenas 45 Hz, a partir dos 49 Hz decidiu-se aumentar o tempo em cada *step* de modo a stressar ainda mais as válvulas, estando

estas sujeitas a 45Hz durante 2 horas. No final do teste e após 8 horas e 50 minutos em funcionamento todas as válvulas continuavam a operar normalmente.

Todas as medições efectuadas neste teste assim como os cálculos são apresentados no anexo B.

4.1.4 Teste de Stress Combinado

Como nenhuma válvula foi destruída nos dois testes anteriores foi proposto um novo teste desta vez com duas variáveis de stress, as mesmas utilizadas nos testes anteriores – Tensão e Frequência.

A combinação destes 2 stresses permite uma melhor aproximação às condições normais de uso e também se espera que este teste seja mais stressante.

Assim, foi definido que o perfil de Tensão para este teste seria o mesmo que foi aplicado anteriormente no teste de Tensão *Step Stress*. No entanto, regista-se uma diferença no tempo em que as válvulas permanecem em cada estado, neste caso o tempo de permanência em cada *step* é de 30 minutos. Já a frequência foi mantida constante no valor mínimo que a fonte de alimentação permite, ou seja, 45 Hz. (Gráfico 15).

É ainda importante referir que as válvulas usadas neste teste foram as que, previamente, foram sujeitas ao teste de Frequência *Step Stress*.

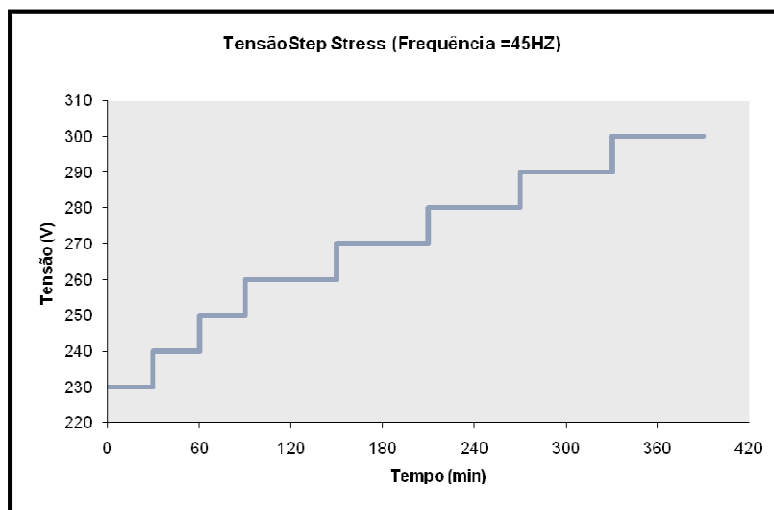


Gráfico 15 – Perfil do Teste Combinado

Os gráficos seguintes mostram a relação entre o aumento da tensão e o aquecimento da bobina (Gráfico 16) e o aumento da resistência com o aquecimento da bobina (Gráfico 17).

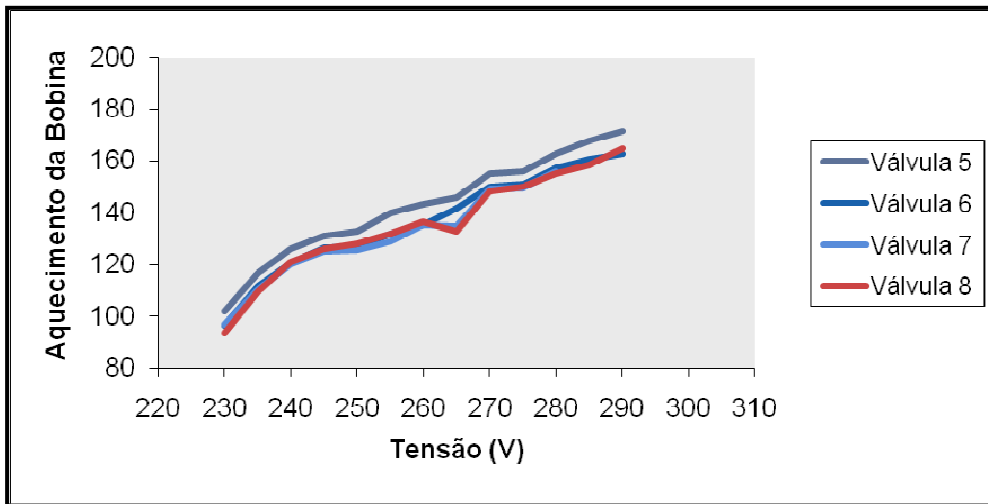


Gráfico 16 - Aquecimento da Bobina em função da Tensão

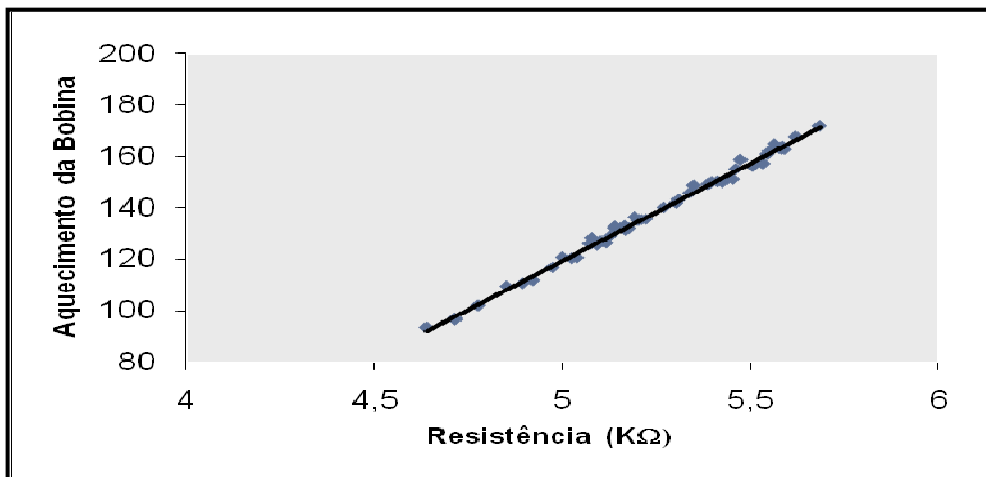


Gráfico 17 - Aquecimento da Bobina em função da resistência

Aquando da realização deste teste conseguiu-se que todas as válvulas falhassem tendo todas queimado. O aspecto da bobina depois de a válvula ter queimado pode ser observado na figura 20. O corte que foi efectuado além de permitir a observação do aspecto da bobina, também permite a verificação do material constituinte do enrolamento, neste caso, o cobre.

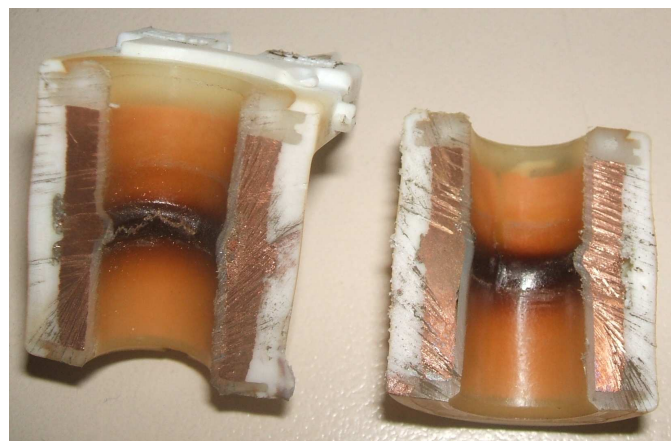


Figura 22 – Aspecto da bobina da válvula após esta ter queimado

Assim aos 295 Volts, falhou a válvula número 8 após uma hora a trabalhar nesse estado. Já as outras 3 válvulas falharam apenas quando a tensão era de 300 Volts. Tal facto pode ser observado na tabela 5.

É ainda importante referir, que após cada válvula ter queimado foi medida a sua resistência tendo sido registado em todas um valor nulo, ou seja todas as válvulas entraram em curto-circuito.

Tabela 5 - Valores registados após cada válvula ter falhado

Válvula N°	Stress (V)	Tempo para falha (horas)	Resistência (kΩ)
8	295	1:00	0
7	300	0:45	0
5	300	1:50	0
6	300	2:50	0

Apesar de, neste teste, se ter verificado que 300V e 45 Hz é o limite destrutivo das válvulas, há a necessidade de provar esse facto dado que as válvulas submetidas a este teste, já haviam sido stressadas no teste anterior.

Assim foi definido um novo teste combinado, mas desta vez com a Tensão constante a 300 V e Frequência a 45Hz, mas com válvulas novas, para se poder confirmar os resultados obtidos no teste anterior.

Como os stresses eram constantes, pôde verificar o aquecimento da bobina, em função do tempo de funcionamento do teste. Teoricamente, seria de esperar que à medida que o tempo avança o aquecimento da bobina aumentasse, no entanto, tal parece não suceder neste caso, apresentando o gráfico alguns mínimos locais. Isto é explicado pela longa duração do teste. Assim este decorria durante 9 horas diárias, no entanto, durante o restante período do dia, as válvulas permaneciam desligadas e isso potenciava o seu arrefecimento. Assim, em cada dia de teste, apresentavam uma temperatura aproximadamente igual à temperatura ambiente.

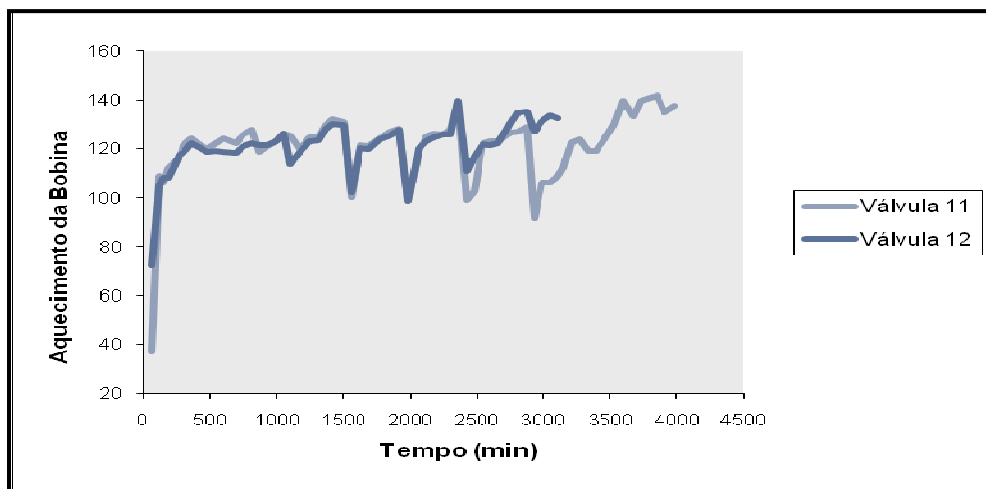


Gráfico 18 – Evolução do aquecimento da Bobina em função do tempo de teste

Tal como nos testes precedentes foi medida a resistência de cada uma das válvulas de teste (Gráfico 19).

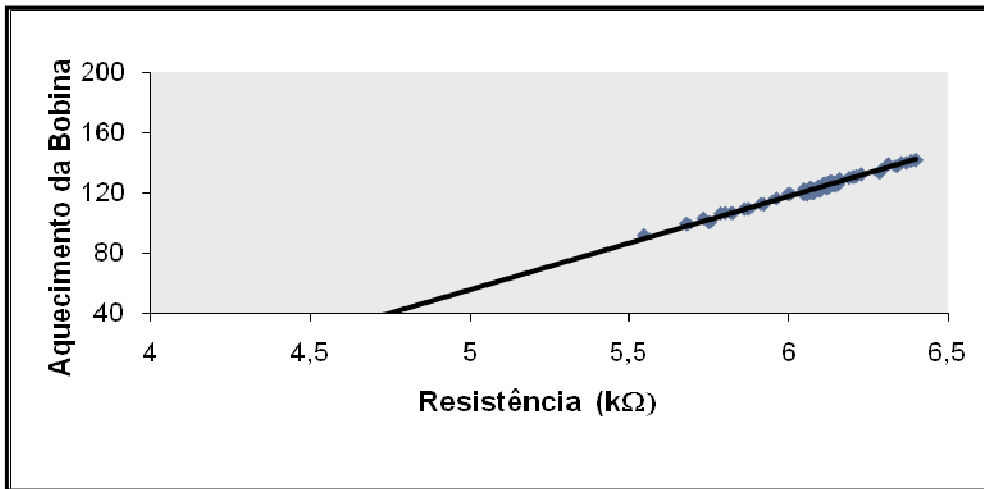


Gráfico 19 – Aumento do aquecimento da Bobina em função da Resistência

Tal como no teste anterior as válvulas falharam porque a bobina queimou, entrando estas em curto-circuito. A tabela 6 fornece informações acerca do tempo de falha e da resistência medida.

Apenas uma válvula continuava operacional após 66 horas de teste.

Tabela 6 - Valores registados após cada válvula ter falhado

Válvula N°	Tempo para Falha (horas)	Resistência (kΩ)
9	1:00	0
10	2:00	0,15032
12	52:30	0,5685

4.1.5 Conclusões

Assume-se, assim, que 300V e 45Hz é o limite destrutivo destas válvulas, no que diz respeito à sua parte eléctrica. A partir dos dados obtidos destes testes cabe agora aos responsáveis pelo desenvolvimento do produto X, fazer uma análise aprofundada para verificar se estas válvulas são suficientemente robustas.

Há, ainda, a necessidade de ter em conta que o limite destrutivo encontrado foi apenas testado para alta tensão e baixa frequência e mantendo todas as outras variáveis aproximadamente constantes. Sabe-se, à partida, que em condições normais as outras variáveis de stress, como a temperatura e a pressão, podem variar e por isso podem fazer diminuir o limite destrutivo encontrado.

Em relação aos testes definidos, no capítulo 3, não foram realizados os que dizem respeito à temperatura como factor de stress. Tal facto ocorreu porque até à data de entrega deste projecto não foi possível reunir as condições para a sua realização, nomeadamente, no que diz respeito ao equipamento necessário.

4.2 QALT

Tendo em conta os resultados obtidos nos testes anteriormente realizados e, apesar de não constar nos testes que haviam sido planeados, foi decidido realizar-se o teste combinado de tensão e frequência, mantendo o mesmo perfil ou seja, tensão constante a 300 Volts e frequência constante a 45 Hz.

Neste sentido, foram testadas 26 válvulas³. A tabela seguinte (tabela 7) apresenta os resultados obtidos, no que concerne ao tempo para falha. Neste teste nem todas as válvulas falharam e esse facto é evidenciado na última coluna da tabela 7 em que F significa que a amostra falhou e S que foi censurado ou seja quando o ensaio terminou a válvula ainda estava operacional.

É importante referir que todas as válvulas que falharam apresentaram resistência nula, ou seja, entraram em curto-circuito. Durante este teste foi possível, ainda, observar outras reacções aquando das falhas das válvulas. Como por exemplo, a dilatação da área da bobina e ainda o aparecimento de bolhas na válvula que ocorreram devido aos gases libertados causado pelo sobreaquecimento. Tal facto está patente na figura 23.

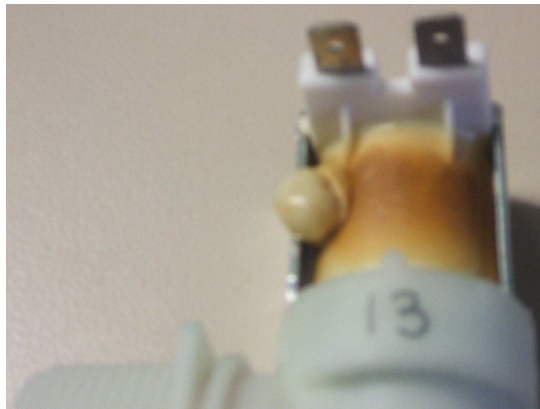


Figura 22 – Bolha formada aquando da falha da válvula

Tabela 7 - Tempos de falha das válvulas testadas

Nr	Tipo	Tempo para falha (horas)	Estado
13	“B”	54:40	F
14	“B”	58:30	F
15	“B”	65:00	S
16	“B”	65:00	S

³ O número de válvulas testadas prendeu-se apenas com o facto de estas serem as disponíveis aquando da realização do teste.

17	“B”	31:20	F
18	“B”	31:20	F
19	“B”	35:30	F
20	“B”	48:10	F
21	“B”	34:15	S
22	“B”	33:25	S
23	“B”	34:15	S
24	“A”	28:05	S
25	“A”	01:20	F
26	“A”	00:50	F
27	“A”	02:00	F
28	“A”	02:20	F
29	“A”	02:00	F
30	“A”	01:00	F
31	“A”	02:00	F
32	“A”	02:00	F
33	“A”	02:20	F
34	“A”	02:20	F
35	“B”	23:00	S
36	“B”	23:00	S
37	“B”	23:00	S
38	“B”	23:00	S

Verifica-se entre as válvulas do tipo “A” e as do tipo “B” uma enorme diferença de tempos para falha. Dado este facto decidiu-se que a análise quantitativa de cada tipo de válvulas seria feita em separado, dado que, caso fosse feita uma única análise para todas as válvulas esta levaria certamente a conclusões erradas.

Assim para as válvulas tipo “A” foram usados os dados da tabela anterior, tendo-se também em conta os tempos obtidos com as unidades 9, 10, 11 e 12.

Para a análise foi considerada a distribuição Weibull e utilizando o programa de análise estatística *SPSS* foram obtidos os valores para os parâmetros de escala e de forma, os quais são apresentados na tabela seguinte (8).

Tabela 8 – Parametros da Distribuição - válvulas “A”

		Tempo
Distribuição	Escala	2,0098
Weibull	Forma	2,853

A partir deste valor é possível estimar os parâmetros a_0 , a_1 e a_2 já que pela equação 14 estes são determinados em função de η .

$$\eta = e^{\sum_{k=0}^m a_k x_k}$$

Equação 16 – vida característica

Onde x_k são as variáveis de stress e a_k representa os parâmetros que estão associados a cada um dos stresses e que são constantes.

Assim, reescreveu-se a equação no entanto fazendo a transformação da tensão para a lei da potência inversa, como aconselhado por Mettas (2000), ficando a equação anterior do seguinte modo (15):

$$\eta = e^{a_0} * e^{F^{a_1}} * T^{a_2}$$

Equação 17 - η em função dos stresses

Em que F é o valor da frequência e T o valor da Tensão.

No caso presente como tanto a tensão e a frequência são constantes ao longo do tempo, o valor de T e F são 300V e 45Hz, respectivamente

Igualando os dois membros da equação e recorrendo ao Excel, nomeadamente ao Solver conseguiu-se obter os seguintes valores (tabela9):

Tabela 9 – Valores de a_0 , a_1 e a_2 - válvulas “A”

a_0	-0,67893
a_1	1,130652
a_2	-7,96103

Usando os valores dos parâmetros estimados e substituindo os valores da Tensão e da frequência pelos valores na condição de uso normal, ou seja, 230V e 45Hz, respectivamente, na equação 15, obtém-se uma vida característica igual a 4753,160178 horas, o que dá aproximadamente 6 meses e meio. Isto significa que após este tempo 63,2 % das válvulas em funcionamento falharam.

Analogamente, ao realizado anteriormente foram obtidos os resultados para as válvulas tipo “B”.

Assim, a tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros de escala e de forma. Já a tabela 11 apresenta os valores de a_0 , a_1 e a_2 .

Tabela 10 – Parâmetros de Distribuição - válvulas “B”

		Tempo
Distribuição	Escala	45,353
Weibull	Forma	2,557

Tabela 11 - Valores de a_0 , a_1 e a_2 - válvulas “B”

a_0	-0,674818
a_1	1,1974535
a_2	-7,94236

No caso das válvulas do tipo “B” a vida característica é de 149085,6 horas, aproximadamente 17 anos, ou seja, após este tempo cerca de 63,2% das válvulas tipo “B” já falharam.

4.2.2 Conclusões

A análise efectuada foi considerada superficial, na medida em que não permite de uma forma conclusiva determinar o tempo de vida esperado para cada tipo de válvula, em condições de uso normais.

Não obstante, esta análise permite, desde logo, fazer uma constatação. As válvulas do tipo “B” são muito mais fiáveis e devem ser as válvulas escolhidas para integrarem o produto X.

No entanto, para uma análise mais aprofundada seria necessário criar um modelo matemático, já que os softwares disponíveis no mercado, não contemplam a frequência como factor de stress e como a solução apresentada na secção 2.3.4.4 apenas a variáveis que tenham vários níveis de stress, o que não é o caso, já que ao longo do teste as variáveis são constantes, para que isso fosse possível seria necessário usar meta-heurísticas e outros métodos, os quais fogem do propósito desta dissertação.

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A proposta desta dissertação foi formulada dentro do contexto da melhoria da fiabilidade. No entanto, o desenvolvimento da fiabilidade vai muito além do apresentado nesta dissertação. Existem outras técnicas, ensaios e análises que também podem e devem ser utilizadas para produzir um produto de alta fiabilidade. Esta dissertação não foi desenvolvida com a intenção de propor uma solução completa ao problema da fiabilidade, mas sim, tratar da parcela que pode ser solucionada através da utilização dos testes acelerados.

Esta dissertação é apenas o ponto de partida sobre este tema e, certamente, muito mais há para aprender e desenvolver sobre esta temática.

Procurou-se apresentar, mesmo que de forma superficial, as informações essenciais para o entendimento dos conceitos envolvidos na implementação dos ensaios.

Em primeiro lugar não há apenas uma única solução correcta ou standard porque cada produto é único. É necessário ter um conhecimento alargado do produto para que seja possível saber quais são os modos de falha mais frequentes destes componentes e consequentemente os seus mecanismos de falha relevantes, para que se possa seleccionar os stresses certos.

Ocorre, não raras vezes o recurso a stresses que provocam os modos de falha seleccionados mas que aquando do uso normal do produto não se verificarão.

A aplicação do HALT como é dispendiosa deverá ser apenas aplicada a produtos que o justifiquem, ou seja, que o cliente ao compra-los já espere uma qualidade/fiabilidade alta.

Depois do desenvolvimento desta dissertação foi possível concluir que esta metodologia é um processo de aprendizagem de tentativas sucessivas e um pouco intuitivas. Como aconteceu com os testes realizados já que aqueles que haviam sido definidos não produziram resultados, foi necessário realizar novos testes tentar outras formas de acelerar o desgaste do produto.

No caso concreto destas válvulas chegou-se à conclusão que o limite destrutivo das mesmas é, a nível eléctrico, 300V e 45 Hz.

Também se pode afirmar, de forma convicta que as válvula do tipo “B” são mais fiáveis que as do tipo “A”.

No entanto, é necessário levar em consideração que tanto os limites obtidos nos testes, como também os valores para a vida característica são obtidos acelerando apenas duas variáveis de stress, o que implica que as outras variáveis que influenciam a vida do produto se mantêm constantes, o que na realidade se sabe não acontecer. Isto implica que em condições normais o limite destrutivo e o tempo que a válvula demora a falhar será, certamente, menor.

Perspectivas de trabalhos futuros

Seria interessante realizar os testes que foram propostos e que não se realizaram, nomeadamente, os testes de temperatura, de modo a perceber-se até que ponto a temperatura influencia as válvulas, e até comparar os valores de temperatura atingidos pelas válvulas com os valores de temperatura atingidos no teste combinado.

Outro teste que não se realizou foi o HASS, e seria, sem dúvida, uma mais-valia para o produto, para que se verifique se durante o processo produtivo houve algum factor que fez decrescer a fiabilidade.

Como se referiu nesta dissertação, em condições normais os produtos estão sujeitos a vários stresses simultaneamente, neste sentido, seria interessante implementar um teste combinado de Tensão, Frequência e ainda outros stresses como a temperatura de modo a tornar o teste o mais próximo da realidade possível e até verificar se o limite encontrado é o mesmo que o que foi encontrado no teste combinado de Tensão e Frequência.

Outro aspecto de grande relevância seria a criação de um modelo matemático para o teste de tensão e frequência que permitisse calcular o tempo de vida em condições de uso.

Poder-se-ia ainda fazer uma análise de projectos de investimento, para tentar quantificar monetariamente os ganhos para a empresa com a implementação destes testes. E se seria vantajoso comprar uma câmara climática que permita a execução de choque térmico.

6 Referências

- Almada-Lobo, Bernardo. *Componentes' Reliability*, Diapositivos da Disciplina de Gestão de Manutenção. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008
- Barnard, R.W.A. Integration of reliability engineering into product Development. In: 2nd SAIAS, Symposium, Stellenbosch, South Africa, 2008.
- Didelet, F."Fiabilidade", Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia, 2003
- Félix, Erico Pessoa. *Análise de Confiabilidade de Sistemas Eletrônicos Complexos baseada em Ensaios Acelerados de Vida*. São Paulo, 2006 Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Freitas, M. A.; Colosimo. E. A. Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados. In: Série Ferramentas da Qualidade, v.12, Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, UFMG, 1997.
- Hartler, Gisela. Parameter Estimation for the Arrhenius Model, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol 5R-35, N°4, 1986.
- Luca, Luciana V. *Recomendações para a Implementação de Ensaios de Estresse Térmico Voltados à confiabilidade de Hardwares Eletrônicos*, Florianopolis, 2004, Tese (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) Universidade Federal de Santa Catarina.
- Jensen, Finn; Petersen, Niels Erik. *Burn-in: An Engineering Approach to the Design and Analysis of Burn-in Procedures*. 1 ed. New York, United States of America. John Wiley & Sons, 1982.
- Ireson, G; Clyde, F Combs; Jr, Richard Y. Moss. *Handbook of Reliability Engineering and Management*. 2 ed. Estados Unidos da América. McGraw-Hill Companies, 1995.
- McLean, Harry W. *HALT, HASS, and HASA explained, Accelerated Reliability Techniques*, Milwaukee, Wisconsin, ASQ Quality Press, 2008
- Mettas, A. Understanding accelerated life testing analysis. In: The International Applied Reliability Symposium - South America Edition, Rio de Janeiro, 2003.
- Mettas, Modeling & Analysis for Multiple Stress-Type Accelerated Life Data. Tucson, 2000
- Nelson, W. A Biography of Accelerated Test Plans, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol 54, N°2, 2005.
- Nelson, W. *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. 2 Ed, USA, Wiley Series in Probability and Statistics, 2004.
- Souza, G.F.M. *Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos*, Apostila do curso, São Paulo, Brasil, 2003.

7 Anexo A: Distribuições de Vida

Exponencial

Esta distribuição é usada frequentemente porque depende apenas de um parâmetro, sendo por isso a mais simples. No entanto, não tem memória (Almada-Lobo, 2008) porque não contabiliza o tempo que o produto já funcionou, logo a sua taxa de falhas é constante ao longo do tempo.

Pode ser vista como um caso particular da distribuição Weibull, onde o parâmetro de forma (β) é igual a 1 e η é igual a $1/\lambda$. A função densidade de probabilidade exponencial pode ser expressa pela equação 14 e o seu comportamento visualizado no gráfico 19.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0$$

Equação 18 – Função densidade probabilidade (Exponencial)

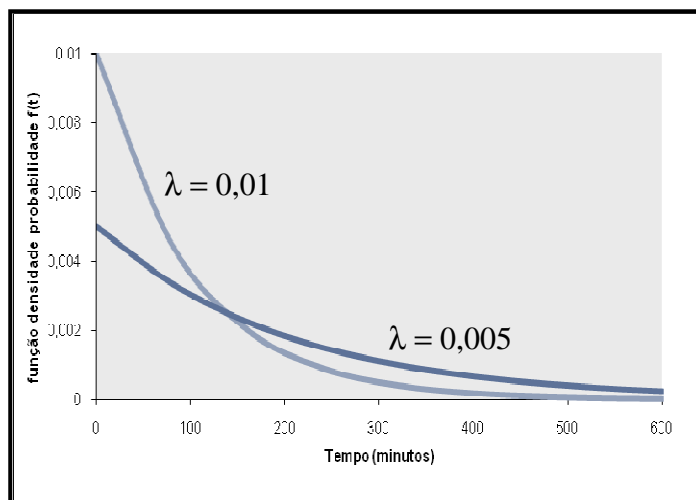


Gráfico 20 - Efeito do parâmetro λ na função distribuição de probabilidade exponencial

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0$$

Equação 19 - Função probabilidade acumulada (Exponencial)

$$h(t) = \lambda, \quad t > 0$$

Equação 20 - Taxa de falhas instantâneas (Exponencial)

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Equação 21 - MTBF (Exponencial)

Como a distribuição exponencial tem uma taxa de falhas instantâneas constante, é adequada para caracterizar o período de vida útil de muitos produtos após o fim da mortalidade infantil.

Weibull

A distribuição Weibull é outra das distribuições mais usadas em análises de fiabilidade. Uma razão da popularidade da distribuição Weibull deve-se ao facto dela apresentar uma grande variedade de formas. A sua função de taxa de falha instantânea pode ser crescente, decrescente, ou constante.

A função densidade de probabilidade relacionada pode ser descrita da seguinte forma:

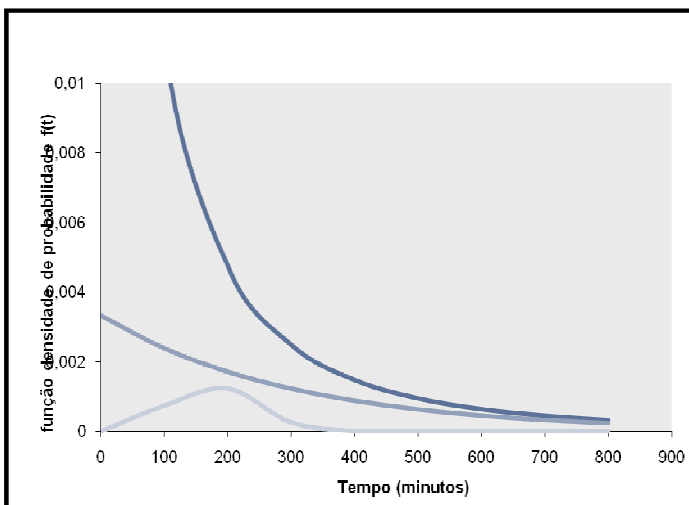
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad t \geq 0$$

Equação 22 – Função densidade probabilidade 3 parâmetros (Weibull)

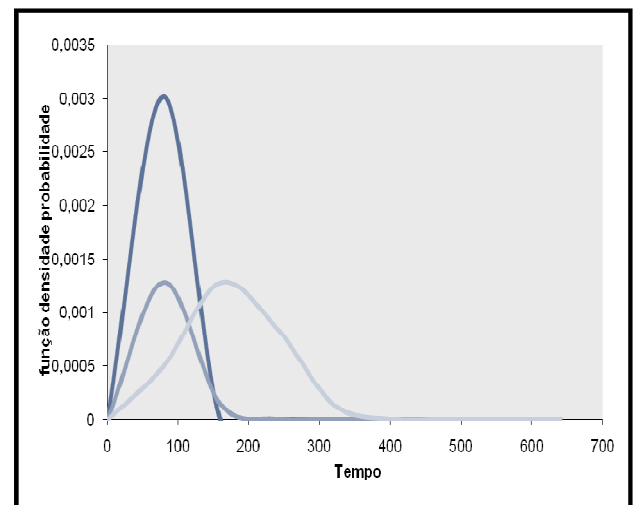
Onde β é o parâmetro de forma, γ o parâmetro de escala, ambos positivos. γ é o parâmetro de posição podendo variar entre $-\infty$ a $+\infty$, no entanto na maioria das vezes assume valor nulo e por isso a equação resume-se:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t \geq 0$$

Equação 23 - Função densidade probabilidade 2 parâmetros (Weibull)



a)



b)

**Gráfico 21 - (a) Efeito do parâmetro β na função densidade de probabilidade (Weibull)
(b) Efeito do parâmetro η na função densidade de probabilidade (Weibull).**

Este é um dos aspectos mais importantes do efeito de β na distribuição Weibull. Como é indicado pelo gráfico, as distribuições Weibull com o $\beta < 1$ têm uma taxa de falhas que diminui com tempo, conhecida também como falhas de mortalidade infantil ou prematuras. As distribuições de Weibull com o β próximo ou igual a 1 têm uma taxa de falhas razoavelmente constante, indicando a vida útil ou de falhas aleatórias. As distribuições de Weibull com $\beta > 1$ têm uma taxa de falhas que aumenta com o tempo, conhecido também como falhas de desgaste. Estes betas abrangem as três fases da curva da banheira. Assim considerando uma distribuição Weibull mista com a uma parte da população com o $\beta < 1$, uma parte população com o $\beta = 1$ e uma outra com o $\beta > 1$, teria um gráfico de taxa de falhas que fosse idêntico à curva da banheira

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

Equação 24 - Função probabilidade acumulada (Weibull)

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot t^{\beta-1}$$

Equação 25 - Taxa de falhas instantâneas (Weibull)

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

Equação 26 – MTBF (Weibull)

onde Γ é uma função dada pela seguinte equação:

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx$$

Equação 27 – Função Gama

LogNormal

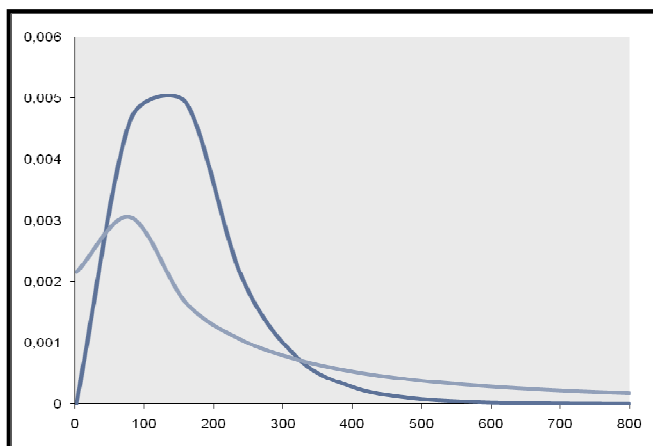
A distribuição lognormal, assim como a Weibull, é um modelo flexível que pode ajustar-se a muitos tipos de dados de falhas. É uma distribuição dita “assimétrica” que pode ser usada para modelar situações nas quais grandes ocorrências de falhas estão concentradas na cauda inicial da faixa de distribuição. A função densidade de probabilidade relacionada pode ser descrita da seguinte forma:

$$f(t) = \left[(2\pi)^{1/2} t \sigma_{T'} \right]^{-1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right)^2}, \quad t > 0$$

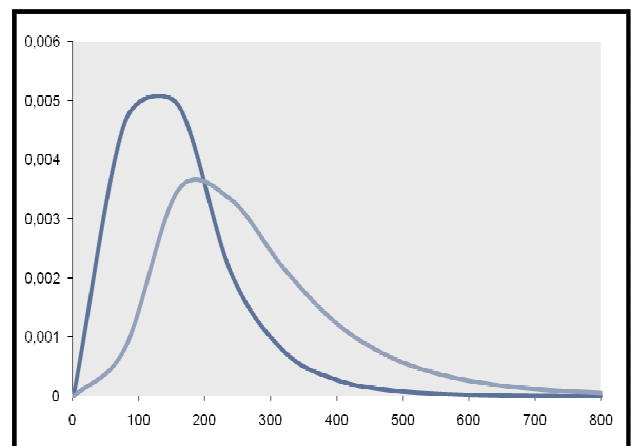
Equação 28 - Função densidade probabilidade (LogNormal)

Onde, T' é o logaritmo natural do tempo para falha ($T' = \ln(t)$), \bar{T}' é a média do logaritmo natural dos tempos para falha e $\sigma_{T'}$ é o desvio padrão do logaritmo natural dos tempos para falha e deve ser positivo. Os parâmetros T' e $\sigma_{T'}$ não são considerados “tempos” como t , eles são variáveis adimensionais.

O valor de $\sigma_{T'}$ determina o formato da distribuição, sendo portanto o parâmetro de forma, e o valor de T' determina o ponto da distribuição em que 50 por cento de probabilidade é acumulado.



a)



b)

**Gráfico 22 - (a) Efeito do parâmetro $\sigma_{T'}$ na função densidade de probabilidade Lognormal
(b) Efeito do parâmetro T' na função densidade de probabilidade Lognormal**

$$F(t) = \Phi \left[\frac{T' - \bar{T}'}{\sigma_{T'}} \right], \quad t > 0$$

Equação 29 - Função probabilidade acumulada (LogNormal)

$$h(t) = \phi \left[\frac{(T' - \bar{T}') / \sigma_{T'}}{t \sigma_{T'} R(t)} \right], \quad t > 0$$

Equação 30 - Taxa de falhas instantâneas (LogNormal)

$$\text{MTBF} = e^{\left(\bar{T} + \frac{\sigma_T^2}{2}\right)}$$

**Equação 31 - MTBF
(LogNormal)**

Alguns autores, afirmam que a distribuição lognormal de tempo para falha, apesar da sua complexidade matemática, apresenta um bom ajuste aos dados reais. E isto deve ser levado em consideração no momento da escolha da distribuição que irá modelar o comportamento de falhas do produto.

8 Anexo B: Dados recolhidos dos testes (HALT)

Tabela 12 - Tensão Step Stress

Nº	Stress (Volt)	Tempo (min)	t2 (°C)	R1 (KΩ)	R2 (KΩ)	ΔT
1	230	5	20.7	3.399	3.983	43.96443071
2	230	5	20.7	3.384	3.912	39.93404255
3	230	5	20.7	3.422	3.881	34.34392168
4	230	5	20.7	3.436	3.861	31.67814319
1	240	5	20.6	3.399	4.236	63.06734334
2	240	5	20.6	3.384	4.179	60.17739362
3	240	5	20.6	3.422	4.149	54.43819404
4	240	5	20.6	3.436	4.152	53.39988359
1	250	5	20.5	3.399	4.48	81.49426302
2	250	5	20.5	3.384	4.42	78.45921986
3	250	5	20.5	3.422	4.385	72.14509059
4	250	5	20.5	3.436	4.363	69.17750291
1	260	5	20.6	3.399	4.676	96.11588703
2	260	5	20.6	3.384	4.589	91.10913121
3	260	5	20.6	3.422	4.513	81.5945938
4	260	5	20.6	3.436	4.51	79.99982538
1	270	5	20.8	3.399	4.733	100.1971756
2	270	5	20.8	3.384	4.592	91.13546099
3	270	5	20.8	3.422	4.519	81.84222677
4	270	5	20.8	3.436	4.548	82.62328289
1	280	5	20.6	3.399	4.741	100.9980583
2	280	5	20.6	3.384	4.668	97.06914894
3	280	5	20.6	3.422	4.612	88.9805377
4	280	5	20.6	3.436	4.612	87.57857974
1	290	5	20.8	3.399	5.078	126.1102383
2	290	5	20.8	3.384	4.91	115.1264184
3	290	5	20.8	3.422	4.824	104.5969024
4	290	5	20.8	3.436	4.822	102.9818976

1	300	20	20.5	3.399	5.213	136.5501324
2	300	20	20.5	3.384	5.125	131.6467199
3	300	20	20.5	3.422	5.06	122.5037989
4	300	20	20.5	3.436	5.098	123.7891153
1	295	10	20.6	3.399	5.393	149.9699912
2	295	10	20.6	3.384	5.347	148.2951241
3	295	10	20.6	3.422	5.294	139.8614845
4	295	10	20.6	3.436	5.206	131.7136787
1	300	75	21.1	3.399	5.654	169.0737864
2	300	75	21.1	3.384	5.537	162.129344
3	300	75	21.1	3.422	5.441	150.3284921
4	300	75	21.1	3.436	5.481	151.6465949

Tabela 13 - Frequência Step Stress

Nº	Stress (Hz)	Dwell Time (min)	t2 (°C)	R1 (KΩ)	R2 (KΩ)	ΔT
5	60	30	23.2	3.421	4.528	82.9919614
6	60	30	23.2	3.431	4.51	80.6485864
7	60	30	23.2	3.425	4.47	78.2351825
8	60	30	23.2	3.409	4.43	76.7916398
5	50	30	23.5	3.421	4.787	102.179421
6	50	30	23.5	3.431	4.749	98.2788108
7	50	30	23.5	3.425	4.69	94.4689051
8	50	30	23.5	3.409	4.663	94.0845409
5	49	40	23.4	3.421	4.766	100.699357
6	49	40	23.4	3.431	4.715	95.8280676
7	49	40	23.4	3.425	4.656	92.0136934
8	49	40	23.4	3.409	4.651	93.2784688
5	48	50	23.3	3.421	4.838	106.21672
6	48	50	23.3	3.431	4.775	100.429379
7	48	50	23.3	3.425	4.719	96.8483504
8	48	50	23.3	3.409	4.694	96.6252273

5	47	60	23.5	3.421	4.915	111.810289
6	47	60	23.5	3.431	4.82	103.605363
7	47	60	23.5	3.425	4.772	100.631474
8	47	60	23.5	3.409	4.737	99.6719859
5	46	80	21.5	3.421	4.885	111.553055
6	46	80	21.5	3.431	4.82	105.605363
7	46	80	21.5	3.425	4.753	101.203562
8	46	80	21.5	3.409	4.784	105.220769
5	45.5	120	21.3	3.421	4.679	96.2533762
6	45.5	120	21.3	3.431	4.62	90.800991
7	45.5	120	21.3	3.425	4.612	90.8069489
8	45.5	120	21.3	3.409	4.606	91.9806982
5	45	120	20.8	3.421	4.902	113.532154
6	45	120	20.8	3.431	4.797	104.57986
7	45	120	20.8	3.425	4.789	104.60908
8	45	120	20.8	3.409	4.766	104.56166

Tabela 14 - Teste de stress combinado I

Nº	Stress (V)	Dwell Time (min)	t2 (°C)	R1 (KΩ)	R2 (KΩ)	ΔT
5	230	30	23.3	3.421	4.777	102.0459222
6	230	30	23.3	3.431	4.716	96.41544739
7	230	30	23.3	3.424	4.715	97.06433995
8	230	30	23.3	3.404	4.64	93.47144536
5	235	30	23.4	3.421	4.974	116.7857059
6	235	30	23.4	3.431	4.922	111.7879627
7	235	30	23.4	3.424	4.895	110.511653
8	235	30	23.4	3.404	4.853	109.4966216
5	240	40	23.4	3.421	5.099	126.2018123
6	240	40	23.4	3.431	5.04	120.6508598
7	240	40	23.4	3.424	5.025	120.2958236
8	240	40	23.4	3.404	5.002	120.7766745

5	245	50	23.5	3.421	5.168	131.2995031
6	245	50	23.5	3.431	5.117	126.3342757
7	245	50	23.5	3.424	5.094	125.3889603
8	245	50	23.5	3.404	5.074	126.1274383
5	250	60	21.7	3.421	5.166	132.9488454
6	250	60	21.7	3.431	5.103	127.0827456
7	250	60	21.7	3.424	5.076	125.834229
8	250	60	21.7	3.404	5.079	128.3059636
5	255	90	22.4	3.421	5.27	140.0830459
6	255	90	22.4	3.431	5.178	132.0159429
7	255	90	22.4	3.424	5.128	129.0478972
8	255	90	22.4	3.404	5.139	132.1482667
5	260	60	22.3	3.421	5.31	143.1961999
6	260	60	22.3	3.431	5.223	135.4958613
7	260	60	22.3	3.424	5.211	135.3947138
8	260	60	22.3	3.404	5.194	136.4120447
5	265	60	22	3.421	5.34	145.7560655
6	265	60	22	3.431	5.303	141.8046051
7	265	60	22	3.424	5.202	135.0173481
8	265	60	22	3.404	5.141	132.6996769
5	270	60	21.9	3.421	5.461	154.9708565
6	270	60	21.9	3.431	5.413	150.1666278
7	270	60	21.9	3.424	5.388	149.1162383
8	270	60	21.9	3.404	5.35	148.6220329
5	275	60	24.1	3.421	5.505	156.0853259
6	275	60	24.1	3.431	5.454	151.046109
7	275	60	24.1	3.424	5.427	149.8514895
8	275	60	24.1	3.404	5.397	149.9801704
5	280	60	24	3.421	5.591	162.6636071
6	280	60	24	3.431	5.534	157.1548528
7	280	60	24	3.424	5.507	155.9725175
8	280	60	24	3.404	5.462	155.0009988
5	285	60	21.3	3.421	5.621	167.6234727

6	285	60	21.3	3.431	5.546	160.7561644
7	285	60	21.3	3.424	5.552	162.0593458
8	285	60	21.3	3.404	5.474	158.6094595
5	290	60	22	3.421	5.684	171.6691903
6	290	60	22	3.431	5.582	162.7600991
7	290	60	22	3.424	5.585	163.8430199
8	290	60	22	3.404	5.565	164.7986193
5	295	60	22.3	3.421		
6	295	60	22.3	3.431		
7	295	60	22.3	3.424		
8	295	60	22.3	3.404	0	
5	300	110		3.421	0	
6	300	170		3.431	0	
7	300	45		3.424	0	

Tabela 15 - Teste de stress combinado II

Nº	Stress (V)	Time (min)	t2 (°C)	R1 (KΩ)	R2 (KΩ)	Δt
9	300	60	24.1	3.435	0	
10	300	60	24.1	3.356	5.364	154.5686532
11	300	60	24.1	4.133	4.727	37.05194774
12	300	60	24.1	4.16	5.327	72.41670673
10	300	120	23,2	3.356	0.15032	
11	300	120	23.2	4.133	5.863	108.9749192
12	300	120	23.2	4.16	5.837	105.0078125
11	300	150	23.4	4.133	5.823	106.3016695
12	300	150	23.4	4.16	5.891	108.1633413
11	300	180	23	4.133	5.913	112.3307525
12	300	180	23	4.16	5.886	108.2526442
11	300	270	22.3	4.133	5.961	116.0329301
12	300	270	22.3	4.16	6.022	117.4036058
11	300	300	23	4.133	6.057	121.3372853

12	300	300	23	4.16	6.044	118.0706731
11	300	360	22.4	4.133	6.092	124.1263731
12	300	360	22.4	4.16	6.098	122.0262019
11	300	420	23	4.133	6.066	121.9001936
12	300	420	23	4.16	6.083	120.4941106
11	300	480	25.9	4.133	6.077	119.6881926
12	300	480	25.9	4.16	6.101	118.7126202
11	300	540	24.8	4.133	6.096	121.9765546
12	300	540	24.8	4.16	6.085	118.8183894
11	300	600	23.6	4.133	6.108	123.927099
12	300	600	23.6	4.16	6.062	118.5891827
11	300	690	23.1	4.133	6.069	121.9878297
12	300	690	23.1	4.16	6.045	118.0328125
11	300	750	23	4.133	6.126	125.6529156
12	300	750	23	4.16	6.087	120.7426683
11	300	810	23.1	4.133	6.160	127.679458
12	300	810	23.1	4.16	6.112	122.1961538
11	300	870	25.9	4.133	6.059	118.562376
12	300	870	25.9	4.16	6.145	121.4467548
11	300	930	25.8	4.133	6.098	121.1016453
12	300	930	25.8	4.16	6.143	121.422476
11	300	990	25.6	4.133	6.121	122.7401887
12	300	990	25.6	4.16	6.166	123.0516827
11	300	1050	23.5	4.133	6.142	126.1536414
12	300	1050	23.5	4.16	6.179	125.9594952
11	300	1100	25	4.133	6.154	125.4041858
12	300	1100	25	4.16	6.009	113.8957933
11	300	1170	25.2	4.133	6.069	119.8878297
12	300	1170	25.2	4.16	6.088	118.6048077
11	300	1245	25.3	4.133	6.145	124.5412775
12	300	1245	25.3	4.16	6.158	122.8545673
11	300	1310	23.3	4.133	6.114	124.6023712

12	300	1310	23.3	4.16	6.135	123.4253606
11	300	1370	23	4.133	6.191	129.7183644
12	300	1370	23	4.16	6.208	128.2615385
11	300	1420	22.9	4.133	6.227	132.0699976
12	300	1420	22.9	4.16	6.237	130.1635817
11	300	1500	23	4.133	6.211	130.9692717
12	300	1500	23	4.16	6.231	129.6907452
11	300	1560	25	4.133	5.752	100.2609485
12	300	1560	25	4.16	5.824	102.4
11	300	1620	25.1	4.133	6.089	121.238737
12	300	1620	25.1	4.16	6.109	120.0097356
11	300	1690	25	4.133	6.083	120.9634648
12	300	1690	25	4.16	6.104	119.7990385
11	300	1770	22.9	4.133	6.097	123.9390999
12	300	1770	22.9	4.16	6.136	123.8875
11	300	1845	22	4.133	6.132	127.0281878
12	300	1845	22	4.16	6.145	125.3467548
11	300	1910	22.3	4.133	6.156	128.2292766
12	300	1910	22.3	4.16	6.186	127.5944712
11	300	1980	22.2	4.133	5.685	98.8704089
12	300	1980	22.2	4.16	5.719	98.67536058
11	300	2060	22	4.133	6.005	119.0849262
12	300	2060	22	4.16	6.062	120.1891827
11	300	2120	22.5	4.133	6.109	125.0896443
12	300	2120	22.5	4.16	6.114	122.9204327
11	300	2180	21.8	4.133	6.112	125.9772804
12	300	2180	21.8	4.16	6.127	124.4282452
11	300	2240	22	4.133	6.109	125.5896443
12	300	2240	22	4.16	6.149	125.5953125
11	300	2300	21.7	4.133	6.135	127.5158239
12	300	2300	21.7	4.16	6.146	125.7088942
11	300	2360	21.4	4.133	6.313	138.9488991

12	300	2360	21.4	4.16	6.365	139.6174279
11	300	2420	21.6	4.133	5.680	99.15768207
12	300	2420	21.6	4.16	5.907	110.9575721
11	300	2480	21.4	4.133	5.734	102.7351319
12	300	2480	21.4	4.16	5.992	116.4394231
11	300	2540	21.5	4.133	6.048	122.274377
12	300	2540	21.5	4.16	6.078	121.6834135
11	300	2600	22	4.133	6.069	123.0878297
12	300	2600	22	4.16	6.083	121.4941106
11	300	2660	22.2	4.133	6.072	123.0754658
12	300	2660	22.2	4.16	6.095	122.0397837
11	300	2750	22.1	4.133	6.123	126.3652795
12	300	2750	22.1	4.16	6.228	130.4043269
11	300	2810	22	4.133	6.131	126.9656424
12	300	2810	22	4.16	6.298	134.8540865
11	300	2870	21.8	4.133	6.159	128.9169127
12	300	2870	21.8	4.16	6.301	135.2405048
11	300	2930	20.9	4.133	5.548	91.60169368
12	300	2930	20.9	4.16	6.155	127.068149
11	300	2990	21.4	4.133	5.787	106.0500363
12	300	2990	21.4	4.16	6.234	131.4771635
11	300	3050	22.1	4.133	5.803	106.3507622
12	300	3050	22.1	4.16	6.279	133.5734375
11	300	3110	23.8	4.133	5.875	109.1540286
12	300	3110	23.8	4.16	6.288	132.4326923
11	300	3150	23.9	4.133	5.923	112.0562061
12	300	3150	23.9	4.16	0.5685	
11	300	3210	24.2	4.133	6.097	122.6390999
11	300	3270	25.1	4.133	6.131	123.8656424
11	300	3330	21.8	4.133	6	118.9721994
11	300	3390	25	4.133	6.048	118.774377
11	300	3460	24.8	4.133	6.124	123.7278248

11	300	3530	23.2	4.133	6.203	130.2689088
11	300	3600	23.1	4.133	6.353	139.7507138
11	300	3670	25.4	4.133	6.284	133.1350835
11	300	3730	24.1	4.133	6.369	139.7514396
11	300	3790	23.9	4.133	6.385	140.9521655
11	300	3850	24.1	4.133	6.3982	141.5777643
11	300	3910	24	4.133	6.29	134.9103557
11	300	3980	24.3	4.133	6.338	137.6125333