

Aplicação da metodologia RAM a motores marítimos fora de bordo

João André Rodrigues Gomes Luís

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Virgínia Isabel Monteiro Nabais Infante

Prof. Alda Maria Pereira Simões

Júri

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis

Orientador: Prof. Alda Maria Pereira Simões

Vogal: Prof. Maria João Pedroso Carmezim

Novembro 2018

Abstract

The market share of the outboard engines is increasing in the maritime engines market. Outboard engines are used in critical situations and a failure could jeopardise users. Hence, it is necessary to improve the reliability of this engines. Performing a Reliability, Availability and Maintainability (RAM) analysis is crucial in order to study the service performance of the engines. Part of the study includes the application of the failure modes effects and criticality analysis (FMECA), which is a step-by-step approach for identifying all possible causes of failures and its effects in designing, manufacturing and assembly process on the engines. In this paper, the FMECA analysis was applied on the engines in order to identify and prioritize by probability of occurrence, detectability and severity, the failures encountered in the workshops, accordingly to the calculated Risk Priority Number (RPN). In addition, corrosion tests were performed because corrosion effects are often a cause of failures. To understand better the process, three different tests were performed. The first consists in studying the behaviour of the current circulating between the anode and the engine for different engine speeds. The second test consists in calculating the corrosion rate in the anode when paired with the engine in static conditions. The last one involves studying the behaviour of the engine potential for different area ratios of the anode and the motor. The results of this analysis could be used to improve the design and maintenance procedures of the outboard engines.

Keywords: RAM, FMECA, RPN, Corrosion, Cathodic Protection, Sacrificial Anode

Resumo

Cada vez mais a preferência por motores fora de bordo, em detrimento dos motores interiores, está a aumentar por parte dos utilizadores das embarcações. A facilidade de montagem, a reparação e a fiabilidade tornaram estes motores a escolha ideal. No entanto, a utilização deste tipo de motores, em ambientes marítimos e regimes mais exigentes de rotação, promove o aumento de avarias e falhas em comparação com o que ocorre nos motores de combustão interna em veículos terrestres.

Neste trabalho desenvolveu-se uma metodologia capaz de identificar e quantificar o risco de inoperacionalidade dos motores fora de bordo, para os modos de falha recorrentemente encontrados. A análise tem por base os princípios da metodologia RAM, que avalia a fiabilidade, a disponibilidade e a manutenibilidade. Devido à forte incidência de corrosão nos motores utilizados em embarcações, foram realizados ensaios de corrosão de forma a melhor compreender o processo de corrosão nos motores, comparando os resultados obtidos com os dados existentes na literatura.

O estudo começa por apresentar as funções dos principais componentes dos motores fora de bordo. Seguidamente, é feita uma análise dos princípios da análise RAM. Para a análise dos modos de falha, utilizou-se a metodologia *failure modes, effects and criticality analysis* (FMECA), na qual são identificados os potenciais modos de falha e risco associado aos mesmos. É feita uma abordagem ao processo de corrosão, com maior incidência no processo de corrosão galvânica. Foram realizados três tipos de ensaios de corrosão, medição da intensidade de corrente para diferentes regimes de rotação do motor; determinação da taxa de corrosão para condições de repouso; medição do potencial de protecção para diferentes razões de área de exposição do ânodo de sacrifício.

Com base nos resultados obtidos, foram tiradas conclusões sobre os modos de falha para os quais devem existir acções de melhoria, tanto no projecto do componente como na manutenção. Dos resultados dos ensaios de corrosão, concluiu-se que a corrente de protecção catódica com ânodo sacrificial de zinco aumenta com a velocidade de rotação do motor, tendendo assintoticamente para $0,51 \text{ A/m}^2$ no motor e $4,65 \text{ A/m}^2$ no ânodo. Calculou-se o valor da taxa de penetração no ânodo em repouso, por medidas electroquímicas (393 nm/hr) e por gravimetria (94 nm/hr). Por fim, obteve-se a correlação entre o potencial do par galvânico e razão de áreas $A_{\text{ânodo}}/A_{\text{motor exposta}}$.

Palavras-chave: RAM, FMECA, RPN, Corrosão, Protecção Catódica, Ânodos Sacrificiais

Agradecimentos

O meu percurso académico finda, por enquanto, com a realização desta dissertação de mestrado. Foram cinco anos de muito trabalho e dedicação que permitiram concluir com orgulho mais uma fase da minha vida.

Quero agradecer à professora Virgínia Infante e à professora Alda Simões por me terem orientado ao longo do trabalho. Pela disponibilidade, aconselhamento e dedicação que mostraram no desenvolvimento deste estudo, tenho de deixar bem expresso a minha sentida gratidão.

Ao Director da Marine Division da Yamaha Motor Europe Sucursal em Portugal, Pedro Nunes, por todo o apoio, motivação e interesse em desenvolver este trabalho em parceria com a Yamaha Marine. Pelas longas horas de conversa, telefonemas e mensagens de forma a que o presente trabalho fosse realizado e articulado com as necessidades da Yamaha Marine.

À Coordenadora de Marketing da Marine Division da Yamaha Motor Europe Sucursal em Portugal, Sandra Cunha, por toda a motivação e energia que transmitiu, tornando a realização do trabalho ainda mais interessante. Por todas as conversas e sessões de *brainstorming* realizadas com vista a decidirmos o tema da dissertação.

Ao Coordenador de Serviço da Marine Division da Yamaha Motor Europe Sucursal Portugal, Luís Pedroso, por todo o conhecimento transmitido ao longo do estágio realizado na Yamaha. Pela disponibilidade em colaborar e rever toda a análise realizada aos motores.

Ao Country Manager da Yamaha Motor Europe Sucursal em Portugal, Filipe Azevedo de Almeida, pela disponibilidade e interesse da empresa na realização do presente trabalho.

Aos meus pais e irmão que sempre me apoiaram e incentivaram a nunca desistir, e a querer ser mais e melhor. Obrigado pela paciência que tiveram ao longo destes anos. Por possibilitarem os meus estudos e todas as condições para que pudesse estudar em Lisboa. Por ao longo do trabalho me terem aconselhado e revisto todo o documento.

A todos os meus amigos e família que de forma directa ou indirecta contribuíram com a sua amizade e motivação ao longo destes anos. Um especial agradecimento aos meus colegas e amigos, Sara, Rúben, Duarte, Margarida, Gonzalez e Andree que acompanharam bem de perto todo o processo.

Ao professor Miguel da Silva Tavares e ao Sérgio Gonçalves por terem disponibilizado o Scan 3D e por terem auxiliado as aquisições 3D do ânodo em análise.

Aos concessionários da rede Yamaha Marine Portugal, por me receberem e colaborarem na recolha de dados das falhas necessários para a análise RAM e FMECA.

Índice

Abstract	iii
Resumo	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Nomenclatura	xvii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	1
1.3. Objectivos	2
1.4. Estrutura da dissertação.....	2
2. Estado da Arte	3
2.1. Motores Fora de Bordo.....	3
2.2. Enquadramento: Reliability, Availability and Maintainability (RAM)	8
2.2.1. Fiabilidade	9
2.2.2. Disponibilidade	15
2.2.3. Manutenibilidade.....	17
2.2.4. Ciclo RAM	17
2.2.5. Tipos de Manutenção	19
2.2.5.1. Funcionamento até à falha (RTF).....	20
2.2.5.2. Manutenção Correctiva (CM)	20
2.2.5.3. Manutenção Preventiva (PM)	21
2.2.5.4. Manutenção de Melhoria (IM).....	22
2.2.5.5. Manutenção Preditiva (PDM)	22
2.2.6. Custos da manutenção.....	23
2.3. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA).....	24
2.4. Corrosão	25
2.4.1. Introdução	25
2.4.2. Corrosão Galvânica	26
2.4.3. Métodos de Protecção contra a Corrosão.....	28
2.4.3.1. Protecção Catódica	28

2.4.3.2. Potencial para Protecção Catódica	30
2.4.3.3. Valores típicos de densidade de corrente para protecção catódica	31
2.4.3.4. Protecção Anódica.....	31
2.4.3.5. Efeito da razão de área de superfície entre o Cátodo e o Ânodo	32
2.4.4. Ensaio de Corrosão	33
2.4.4.1. Classificação dos ensaios de Corrosão	34
2.4.4.2. Necessidade de realização de Ensaio de Corrosão.....	34
3. Métodos	35
3.1. Metodologia Reliability, Availability and Maintainability (RAM).....	35
3.1.1.1. Análise Funcional do sistema.....	35
3.1.1.2. Diagrama de blocos da Fiabilidade	35
3.1.1.3. Métodos de análise dos Modos de Falha.....	37
3.1.1.4. Acções de Mitigação do Risco	37
3.1.1.5. Requisitos RAM	37
3.2. Metodologia e Etapas da Análise FMECA	38
3.3. Cálculo da Taxa de Falha	40
3.4. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração.....	41
3.4.1. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração através da Lei de Faraday	41
3.4.2. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração através da perda de massa	42
4. Caso de Estudo.....	43
4.1. Identificação e descrição dos potenciais modos de falha	43
4.2. Ensaio de Corrosão	46
4.2.1. Condições em comum dos três tipos de ensaio.....	47
4.2.2. Medição da Intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de protecção para diferentes regimes de rotação do motor.....	48
4.2.3. Quantificação da taxa de corrosão/ penetração do ânodo.....	53
4.2.4. Medição do Potencial do motor para diferentes razões de área de exposição do motor e do ânodo	54
4.2.5. Determinação da área de superfície do ânodo em estudo	55
5. Resultados e Discussão	59
5.1. Acções de Mitigação de risco.....	59
5.2. Disponibilidade, Taxa de Avaria e Fiabilidade	66
5.3. Análise do sistema de protecção catódica – Ensaio de corrosão.....	67
5.3.1. Medição da Intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de sacrifício para diferentes regimes de rotação do motor.....	67
5.3.2. Quantificação da taxa de corrosão/ penetração do ânodo.....	69

5.3.3. Medição do Potencial Eléctrico do motor para diferentes áreas de exposição do ânodo.....	70
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	73
6.1. Conclusões	73
6.2. Trabalhos Futuros.....	74
7. Referências.....	75
8. Anexos	79

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de funcionamento de um motor fora de bordo [3].	5
Figura 2: Principais componentes do motor fora de bordo [3].	7
Figura 3: Gráfico "Curva da Banheira" [18].	11
Figura 4: Comportamento da função densidade de probabilidade para diferentes valores de β [23].	12
Figura 5: Efeito do parâmetro de forma, na taxa de avaria $\lambda(t)$ [23].	12
Figura 6: Efeito do parâmetro de escala η , na função densidade de probabilidade $f(t)$ [23].	12
Figura 7: Efeito do parâmetro de localização γ , na função densidade de probabilidade $f(t)$ [23].	13
Figura 8: Gráficos representativos da distribuição exponencial negativa das funções densidade de probabilidade, fiabilidade e taxa de falha ou risco em função do tempo. [20].	14
Figura 9: Gráficos representativos da distribuição Normal das funções densidade de probabilidade, fiabilidade e taxa de falha ou risco em função do tempo [20].	15
Figura 10: Representação Ciclo de Vida de um Sistema/Componente.	16
Figura 14: Ciclo RAM (Adaptado de Ciclo RAMS [15]).	18
Figura 11: Fluxograma diferentes tipo de manutenção.	19
Figura 12: Visão Tradicional dos custos de manutenção (adaptado de [24]).	23
Figura 13: Visão Total dos custos de manutenção (adaptado de [24]).	24
Figura 15: Ciclo de Corrosão (Adaptado de [32]).	25
Figura 16: Corrosão Galvânica.	26
Figura 17: Série Galvânica de alguns metais e ligas comerciais em água do mar [33].	27
Figura 18: Valores de Potencial entre metais e Eléctrodo de Referência de Calomelanos saturado (ECS) em água salgada [34].	28
Figura 19: Protecção catódica por corrente imposta aplicado a um tanque subterrâneo (Adaptado de [33]).	29
Figura 20: Protecção de um tubo de aço com um ânodo de sacrifício de magnésio (Adaptado de [33]).	29
Figura 21: Diagrama de Pourbaix do Ferro à concentração iónica de 1.0 mM [36].	30
Figura 22: Protecção anódica aplicada a um tanque de aço contendo ácido sulfúrico (Adaptado de [33]).	32
Figura 23: Ensaio de variação de área entre o cátodo e o ânodo (Placa em Cobre e Rebites em Aço) [39].	33

Figura 24: Ensaio de variação de área entre o cátodo e o ânodo (Placa em Aço e Rebites em Cobre) [39].	33
Figura 25: Esquema Sistema em Série	36
Figura 26: Esquema Sistema em série com três componentes (componente B) em paralelo	36
Figura 27: Componentes utilizados nos ensaios de corrosão.	48
Figura 28: Esquema unidade inferior do motor	49
Figura 29: Esquema de montagem no ensaio da medição da intensidade de corrente	50
Figura 30: Estabilizador de direcção após revestimento de epóxi.	51
Figura 31: Parafuso maquinado em Teflon	51
Figura 32: Furo realizado no ânodo	52
Figura 33: Ligação e Protecção da ligação entre o ânodo e o cabo de ligação ao amperímetro	52
Figura 34: Montagem do motor durante o ensaio de determinação da taxa de corrosão/penetração do ânodo	53
Figura 35: Esquema montagem da medição do potencial eléctrico recorrendo a um eléctrodo de referência de Calomelanos saturado (ECS)	55
Figura 36: Conjunto scanner 3D utilizado para a obtenção do valor da área da superfície do ânodo	56
Figura 37: Passo de calibração do Scanner 3D	57
Figura 38: Mesa rotativa com marcas e posicionamento da amostra	57
Figura 39: Gráfico de Barras com identificação do número RPN por modo de falha	63
Figura 40: Pré filtro de combustível	64
Figura 41: Termostato com falha (A união entre o perno e a chapa da válvula falhou por efeitos de da corrosão)	65
Figura 42: Bomba de água	66
Figura 43: Curva de tendência do valor dos valores de Intensidade de Corrente para diferentes velocidades de rotação do motor.	68
Figura 44: Imagem obtida pelo Scan 3D do ânodo em estudo, após os 31 dias da duração do ensaio.	70
Figura 45: Curva de tendência da razão de área vs potencial	71

Índice de Tabelas

Tabela 1: Propriedades dos ânodos de sacrifício (Adaptado de [35]).	31
Tabela 2: Densidade de corrente necessária para a protecção do aço em certos ambientes (Adaptado de [35]).	31
Tabela 3: Probabilidade de Ocorrência de falha segundo Stamatis [26]	39
Tabela 4: Probabilidade de ocorrência de falha segundo Hassankiadeh [40]	39
Tabela 5: Índices de Frequência de Ocorrência	39
Tabela 6: Índices de Severidade da Falha	40
Tabela 7: Índice de Detectabilidade	40
Tabela 8: Listagem dos potenciais modos de falha	43
Tabela 9: Probabilidade de ocorrência de falhas	45
Tabela 10: Efeitos potenciais causados pela falha nos sistemas adjacentes	45
Tabela 11: Probabilidade de a falha ser detectada antes que ocorra	45
Tabela 12: Risco Inoperacionalidade/ RPN	46
Tabela 13: Tabela modos de falha vs RPN	46
Tabela 14: Principais lões dissolvidos na água do mar	47
Tabela 15: Razão de área entre o ânodo de sacrifício e o motor.	54
Tabela 16: Tabela da análise dos modos de falha completa.	60
Tabela 17: Tabela sumária dos valores de disponibilidade e da taxa de avaria por componente	67
Tabela 18: Valores de Intensidade de Corrente para diferentes regimes de rotação, após três horas de funcionamento do motor.	68
Tabela 19: Densidade de Corrente do motor e do ânodo de sacrifício para diferentes regimes de rotação.	68
Tabela 20: Níveis relativos de protecção à corrosão (Adaptado de [30]).	69
Tabela 21: Potencial para diferentes razões de área entre o ânodo e o motor.	71

Nomenclatura

D	Detectabilidade
DFR	Distribuição da Frequência Relativa de Ocorrência
F	Frequência de Ocorrência
FMECA	Failure modes, Effects and Criticality Analysis
MCBF	Mean cycles between failures
MDBF	Mean distance between failures
MDT	Mean down time
MTBF	Mean time between failures
MTTF	Mean time to failure
MTTR	Mean time to repair
MWT	Mean waiting time
RAM	Reliability, Availability, Maintainability
RPN	Risk Priority Number
S	Severidade

1. Introdução

Apresentam-se neste capítulo breves noções que darão a entender o conteúdo do trabalho realizado, no âmbito da unidade curricular de dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico. Este capítulo divide-se em quatro partes. O enquadramento da dissertação, a motivação que deu origem a esta dissertação, os objectivos da análise realizada e a estrutura da presente dissertação.

1.1. Enquadramento

O aumento da concorrência imposto pela globalização e necessidade de satisfazer as exigências dos utilizadores de embarcações profissionais e de recreio, conduziu a uma constante necessidade de otimizar e melhorar os motores marítimos no que diz respeito à fiabilidade e redução dos custos de aquisição e de funcionamento.

O sector dos motores fora de bordo na Europa é bastante competitivo, contando com apenas seis marcas, sendo que duas delas representam mais de metade das vendas. Desta forma, a Yamaha tem vindo, desde sempre, a propor novas tecnologias de forma a destacar-se da concorrência. A Yamaha é a marca que mais aposta na componente do serviço e procedimentos pós-venda, sendo estas uma das vertentes de destaque e que são reconhecidas pela comunidade náutica.

Desta forma, todos os procedimentos de manutenção e de análise dos produtos da Yamaha têm grande importância, de forma a aumentar, ainda mais, a cota de mercado da marca.

1.2. Motivação

O foco da Yamaha é exceder as expectativas dos clientes em relação aos seus produtos, de forma a garantir um elevado grau de satisfação naqueles.

A importância que a Yamaha atribui na avaliação, em termos de performance em serviço e de durabilidade, dos produtos que fabrica, constituiu o ponto de partida, e a motivação, para esta dissertação que incide na análise dos modos de falha e análise do processo de corrosão nos motores fora de bordo. A dureza dos ambientes marítimos, a que os motores são sujeitos, potenciam fortemente os efeitos da corrosão que representam custos de imagem para as marcas. De modo a conhecer os produtos, identificar os modos de falha e realizar os ensaios de corrosão, foi realizado um estágio de seis meses na Yamaha Marine Portugal.

1.3. Objectivos

O presente estudo apresenta como principais objectivos a identificação e análise dos principais modos de falha dos motores fora de bordo, bem como o estudo do processo de corrosão e medidas de protecção dos efeitos da corrosão. Deste modo, os objectivos do presente estudo são:

- Estudar o método de análise RAM;
- Identificar, analisar e elaborar uma lista dos potenciais modos de falha dos motores fora de bordo;
- Estabelecer e analisar os parâmetros de quantificação dos potenciais modos de falha;
- Estabelecer os graus de risco de inoperacionalidade dos modos de falha e as acções de mitigação dessas falhas;
- Estudo do processo de corrosão galvânica e métodos de protecção contra a corrosão;
- Realização de três ensaios de corrosão de forma a determinar a intensidade de corrente que circula entre o ânodo de protecção e o motor, determinar a taxa de corrosão do ânodo de sacrifício e medição do potencial para diferentes razões de área de exposição do ânodo e do motor.

1.4. Estrutura da dissertação

O documento encontra-se estruturado em seis capítulos, sendo o primeiro destes capítulos a introdução. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos princípios RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) e do processo de corrosão, necessários para o desenvolvimento do caso do estudo. O terceiro capítulo descreve os métodos utilizados tanto na análise dos modos de falha como no cálculo da taxa de corrosão. O caso de estudo é desenvolvido no capítulo quatro, com a descrição do trabalho efectuado para a análise FMECA (*Failure modes, Effects and Criticality Analysis*) e a descrição dos ensaios de corrosão realizados. No capítulo cinco são apresentados os resultados da análise de cada modo de falha, as acções de mitigação de risco para cada modo de falha, assim como são apresentados os valores da disponibilidade e fiabilidade aproximados dos motores. Os resultados e a análise dos mesmos são também apresentados neste capítulo. Por último, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado bem como as recomendações para trabalhos a desenvolver futuramente.

2. Estado da Arte

2.1. Motores Fora de Bordo

Os motores Fora de Bordo, que devem a sua designação à posição que ocupam nas embarcações, acoplados no painel de popa, surgiram na sequência do desenvolvimento da motorização dos meios de transporte, numa fase posterior à utilização do vapor como fonte de energia, nos finais do século XIX e como motor de combustão interna.

O motor de combustão interna é uma evolução dos motores a vapor. Estes, que queimavam o combustível fora dos cilindros, abriram caminho aos motores de combustão interna, queimando no interior dos cilindros uma mistura de ar e gás de iluminação. O ciclo de 4 tempos foi utilizado com êxito pela primeira vez em 1876, num motor construído pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto. Neste motor o combustível era comprimido antes de ser inflamado, o que resultava num considerável aumento de rendimento do motor [1]. Ao utilizar como combustível gasolina em vez de gás, conseguiu-se que o motor dispusesse de uma alimentação de carburante independente; a partir de então, pôde converter-se em objecto móvel.

Posteriormente, a intervenção de outros protagonistas, numa interessante concorrência pelo desenvolvimento dos motores, muito focados no incremento do sector automóvel, permitiu que o funcionamento do motor de combustão atingisse a performance que se conhece. Depois de um motor com um único cilindro e de baixa rotação de Otto, evoluiu-se para motores com dois cilindros e rotação mais elevada de Daimler-Maybach; melhorias nos sistemas de ignição, passando de um tubo mantido ao rubro, graças a um acendedor colocado na extremidade oposta, para um sistema eléctrico com vela de ignição desenvolvido por Benz. Outros desenvolvimentos foram sucessivamente introduzidos, para um melhor funcionamento dos motores, como, por exemplo, a alimentação da gasolina por carburadores mais eficientes e sistemas de arrefecimento mais eficazes. Décadas depois, principalmente após a década de 50 do século passado, muito devido ao esforço de guerra, assistiu-se a notáveis progressos na construção de motores, que passaram a beneficiar de novas tecnologias, de que é exemplo a introdução de novas ligas metálicas e sistemas electrónicos no controlo do motor.

Um motor fora de bordo, também conhecido por motor de popa, é um sistema de propulsão para barcos, consistindo de uma unidade autónoma que inclui motor, caixa de transmissão e hélice ou unidade de jacto, projectado para ser afixado na parte externa do painel de popa. Esta configuração motorizada constitui o sistema de propulsão mais comum em pequenas embarcações. Além de fornecer propulsão, os motores de popa permitem controlar a direcção da embarcação, pois são projectados para girar sobre os grampos de fixação e, assim, controlar a direcção do impulso. O *skeg*, pequena quilha na extremidade inferior da coluna do motor, funciona como um leme quando o motor não está em funcionamento. Ao contrário dos motores internos, os motores externos podem ser facilmente removidos para armazenamento ou reparação [2].

O funcionamento de um motor fora de bordo é relativamente simples. No seu interior ocorrem as seguintes acções, conforme se pode ver no esquema da Figura 1:

1 - O combustível, proveniente de um depósito não mostrado na imagem, é queimado no cilindro (ou cilindros) para produzir energia.

2 - Alimentado pela queima e expansão dos gases combustíveis, o pistão move-se para a frente e para trás no cilindro. Existem dois tipos de motor, com ciclos de funcionamento diferentes, motores de dois ou quatro tempos. Ao contrário dos motores a dois tempos, em que há uma combustão por cada volta da cambota (ou seja, o seu ciclo possui apenas duas fases: compressão/admissão e combustão/escape, em apenas dois movimentos do êmbolo), nos motores a quatro tempos, o ciclo de combustão é realizado a cada duas voltas da cambota.

Primeiro tempo: a admissão é a primeira fase, em que o pistão se movimenta do topo à base do cilindro para permitir a entrada de uma mistura de ar e combustível. Durante este movimento, a válvula de escape permanece fechada, enquanto a válvula de admissão está aberta, fechando-se imediatamente antes do pistão terminar o referido movimento.

Segundo tempo: dá-se a compressão pelo movimento inverso do pistão dentro do cilindro. Regressando da base ao topo, o pistão começa a aumentar a compressão da mistura ar/combustível dentro do cilindro.

Terceiro tempo: ocorre a explosão/combustão da mistura de ar/combustível através da faísca na vela de ignição, que provoca a incandescência da mistura. Neste processo há um aumento da temperatura dentro do cilindro e os gases da combustão expandem-se, realizando trabalho sobre o pistão que se movimenta novamente do topo à base.

Quarto tempo: nesta que é a última fase de um ciclo completo de um motor de 4 tempos, o pistão retorna ao topo empurrando os gases de combustão que se libertam pela válvula de escape. No final do movimento, a válvula de escape fecha-se novamente e recomeça o processo com a abertura da válvula de admissão.

3 - A biela acciona a cambota, convertendo o movimento de vaivém do pistão num movimento rotativo da cambota.

4 - A cambota gira o eixo de transmissão que percorre a coluna da estrutura do motor até à caixa de transmissão da hélice.

5 - Caixa de engrenagens, ou caixa de transmissão, na parte inferior do eixo de transmissão, que converte o movimento de rotação vertical em movimento de rotação horizontal.

6 – Hélice, que é accionada por engrenagens giratórias horizontais.

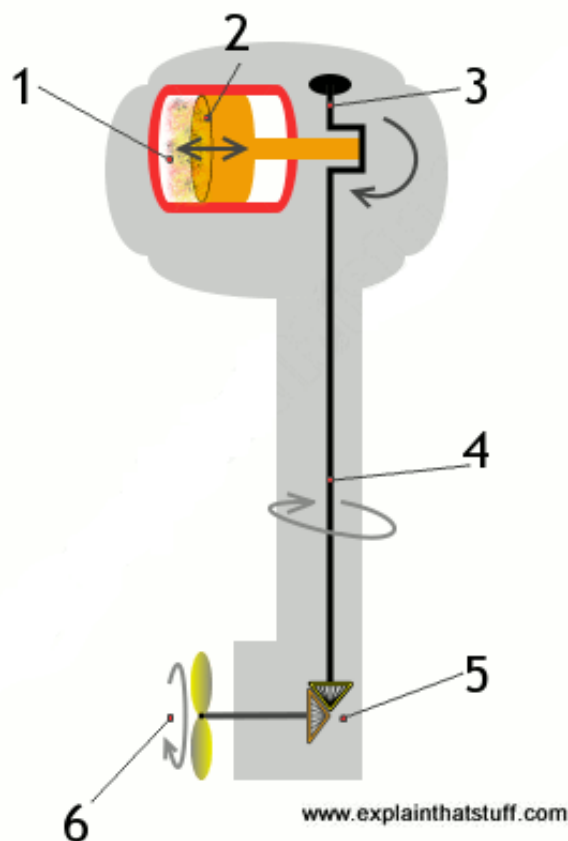


Figura 1: Esquema de funcionamento de um motor fora de bordo [3].

Na realidade, os motores são um pouco mais complexos, pois dispõem de um conjunto muito alargado de componentes, fixos e móveis. Na Figura 2 (esquema propositadamente simplificado e colorido para facilitar a sua visualização na pequena escala em que se apresenta - Nota do autor citado), temos um corte preparado pelo fabricante Suzuki Motor Corporation, para um pedido de patente que foi concedido em 1999 para um novo projecto (Patente dos EUA n.º 5.980.341: Motor de Popa).

Breve descrição dos principais componentes do motor fora de bordo:

1 – Volante de inércia (azul): uma estrutura metálica e circular, com massa considerável. Devido à inércia introduzida pela sua rotação, permite manter a velocidade suave e constante do motor.

2 – Motor de arranque (cinza): normalmente os motores fora de borda têm um sistema eléctrico para o arranque. Se isso não for possível, por avaria ou indisponibilidade do mesmo como acontece com motores de menores dimensões ou mais antigos, o arranque é feito por um cabo de tracção à roda volante, que permite accionar o motor e colocá-lo em funcionamento.

3 – Cambota (vermelho): transmite a potência gerada pela combustão nos cilindros do motor, através das bielas e transmite-a para o veio de saída. Os pistões estão em posições diferentes (fora de passo) para manter o funcionamento mais estável do motor (e rotação constante).

4 – Cilindros (azul): neste modelo o motor dispõe de três cilindros dispostos horizontalmente. O cilindro é um componente fixo do bloco do motor, onde se movimenta o pistão e ocorre a combustão do combustível, que dá origem à potência mecânica.

5 – Pistões (amarelo): movem-se para frente e para trás nos cilindros, impulsionados pela energia libertada pela queima de combustível, e transferem essa energia para a cambota.

6 – Carburadores (laranja): um ou mais carburadores separados, após misturarem o combustível com ar, injectam a mistura explosiva nos cilindros. Neste modelo há um carburador para cada cilindro.

7 – Árvore de cames (verde): é um veio de ressaltos ou eixo de comando de válvulas, um mecanismo destinado a regular o funcionamento das válvulas num motor de combustão interna, abrindo e fechando as válvulas para deixar entrar combustível e libertar o gás resultante da combustão. O movimento de rotação do veio é feito de forma coordenada com a rotação da cambota e posição dos pistões.

8 – Bomba de combustível: aumenta a pressão do combustível no circuito de combustível. Pode existir mais do que uma bomba de combustível de forma a aumentar a pressão do combustível em diferentes estágios

9 – Velas de ignição (vermelho): inflama, através de uma faísca, o combustível nos cilindros.

10 – Suporte de montagem: Sistema de grampos para a fixação do motor ao painel da popa do barco, e que permite girar o motor para cima e para baixo, consoante a embarcação está varada (a seco) ou a flutuar, respectivamente.

11 – Veio de transmissão: veio que transmite a potência da cambota para a caixa de transmissão (caixa de engrenagens), que por sua vez transmite a potência para a hélice, pondo-a em rotação.

12 – Placa de cavitação / Anti ventilação: cavitação é um fenómeno que acontece quando o movimento de rotação da hélice, ao fazer baixar a pressão na água, origina a vaporização local da água com consequente formação de bolhas de gás. Este fenómeno desgasta a superfície da hélice e potencia os efeitos da corrosão. A placa anti-cavitação é projectada para reduzir esse efeito.

13 – Caixa de engrenagens: as engrenagens (não mostradas) permitem converter o movimento de rotação vertical em movimento de rotação horizontal, assim como suspender a rotação da hélice (ponto morto), engrenar avante e engrenar a ré.

14 – Hélice.

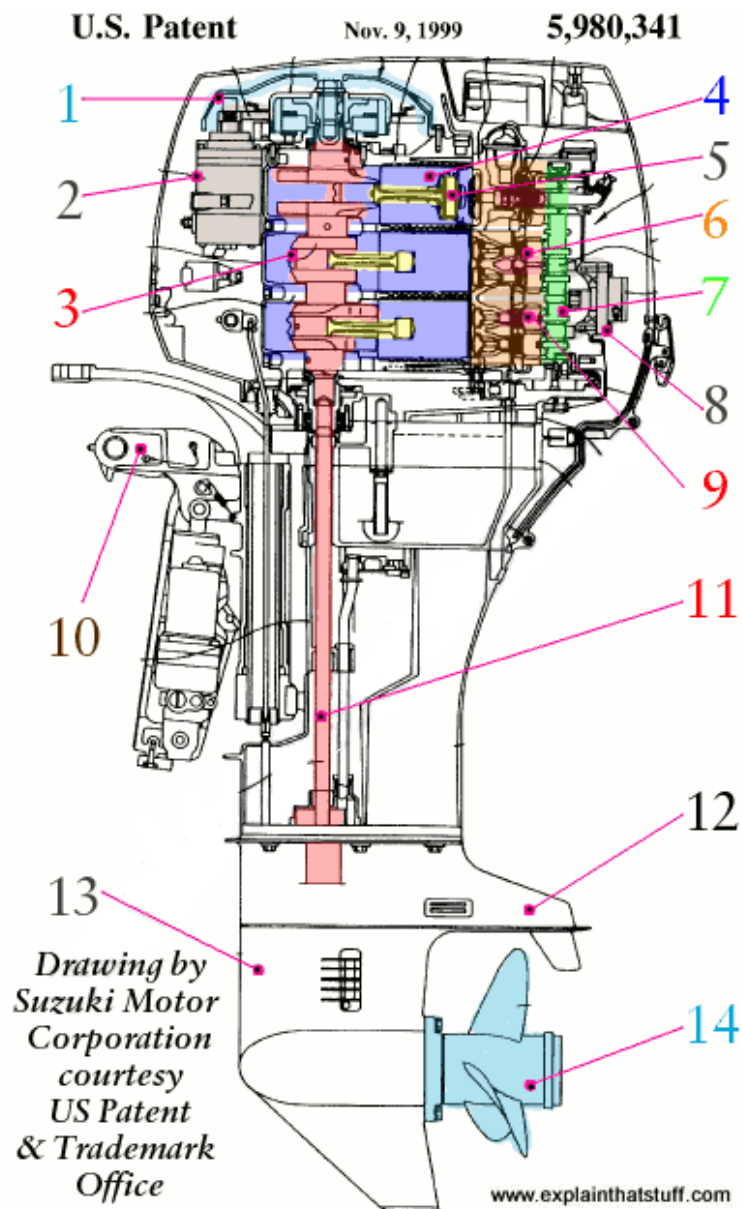


Figura 2: Principais componentes do motor fora de bordo [3]

Numa pequena abordagem histórica sobre a criação e desenvolvimento do motor de popa, o primeiro motor de popa conhecido foi uma pequena unidade eléctrica de 5 kg (11 lb) projectada em 1870 por Gustave Trouvé [4], e patenteada em Maio de 1880 (Patente N ° 136.560) [5]. Posteriormente estima-se que cerca de 25 motores de popa a gasolina possam ter sido produzidos em 1896 pela American Motors Co. [2], mas nenhum desses dois esforços pioneiros parece ter tido muito impacto.

O motor de popa *Waterman* foi o primeiro motor fora de borda a gasolina comercializado, tendo atingido algum sucesso [6]. Desenvolvido por Cameron Waterman [7], um jovem estudante de engenharia de Yale, foi construído a partir de 1903, com um pedido de patente em 1905 [3]. A partir de 1906 [8] [9], a empresa passou a construir as suas unidades "Porto-Motor" [10] [11], tendo vendido cerca de 25 000 unidades até 1914 [12].

O primeiro motor de popa com mais sucesso no mercado [11] foi criado pelo inventor norueguês-americano Ole Evinrude, em 1909 [13]. Entre 1909 e 1912, foram produzidos milhares de unidades. A década de 1920 foi uma época alta para o motor de popa com as marcas Evinrude, Johnson, ELTO, Atwater Lockwood e dezenas de outros fabricantes.

Historicamente, a maioria dos motores de popa eram a dois tempos devido à simplicidade inerente ao projecto, fiabilidade, baixo custo e baixo peso. As desvantagens incluem o aumento da poluição, devido ao considerável volume de gasolina não queimada, acumulação de óleo no sistema de escape e alto nível de ruído.

A tendência actual é para a construção de motores a quatro tempos. Em 1964, a Honda Motor Co. lançou o seu primeiro motor de popa a quatro tempos [14]. Em 1984 foi a vez da Yamaha introduzir seu primeiro motor fora de bordo a quatro tempos. Esses motores estavam disponíveis apenas em baixas potências, tendo vindo a expandir a sua gama de motores, sendo que actualmente já dispõem de versões na ordem dos 400 cv. As regulamentações norte-americanas e europeias para as emissões de escape levaram à proliferação de motores de popa de quatro tempos. No início, fabricantes norte-americanos como a Mercury e a OMC usaram tecnologia de motores de fabricantes japoneses, como a Yamaha e a Suzuki, até que pudessem desenvolver os seus próprios modelos de quatro tempos. As vantagens inerentes dos motores de quatro tempos incluem: menor poluição (especialmente óleo na água), redução de ruído, aumento da economia de combustível e aumento do torque do motor a baixa rotação.

2.2. Enquadramento: Reliability, Availability and Maintainability (RAM)

Depois de uma breve resenha histórica sobre a criação e desenvolvimento do motor de popa, e introdução ao funcionamento deste tipo de motor, importa realizar uma análise estruturada do comportamento do motor quanto aos aspectos ligados à manutenção. Desta forma será apresentada e utilizada a metodologia RAM (Reliability, Availability and Maintainability) aplicada a motores marítimos fora de bordo.

Qualquer componente ou conjunto de componentes, por mais bem que seja idealizado e construído, terá desde a sua génese, inevitavelmente, uma potencial taxa de avarias que importa ter em consideração, tendo em conta a necessidade em garantir a fiabilidade do equipamento e diminuir o desperdício de recursos. Deste modo, essas falhas ou avarias podem, não só, colocar em risco a integridade física do utilizador do equipamento, o homem, e até outros seres vivos, assim como colocarem em causa outras estruturas do sistema mecânico em que o componente em falha está montado.

A preocupação em dimensionar sistemas com mecanismos de segurança surgiu a par com o desenvolvimento da tecnologia, mas essencialmente com as lições tiradas de incidentes ocorridos.

Desde que o Ser Humano iniciou o fabrico de ferramentas e equipamentos houve o cuidado de testar e melhorar os mesmos, sem que, no entanto, houvesse procedimentos formais para a recolha de dados e análise dos mesmos, algo que só mais tarde veio a ser equacionado com a implementação de sistemas de gestão de qualidade, suportados pela definição e publicação de Normas.

Até ao princípio do século XX, a produção de equipamentos estava menos constrangida pelos custos e pelos prazos apertados, resultantes das pressões dos mercados. Na maior parte dos casos levava a que a fiabilidade dos equipamentos fosse muito alta dado o sobredimensionamento no design. O registo das falhas ou avarias não era considerado importante, já que não havia interesse em utilizar técnicas de previsão das taxas de avarias. Para além disso, os componentes eram fabricados individualmente, originando componentes únicos não existindo por isso a repetibilidade necessária para uma análise da taxa de avaria [15].

Com o advento da produção em massa houve a necessidade da standardização dos componentes, o que levou a que fosse possível inspeccionar, testar e verificar a fiabilidade dos equipamentos. O esforço de guerra da 2.^a Guerra Mundial foi também crucial no impulsionar de estudos da fiabilidade dos equipamentos, já que se constatou, nos vários ramos das Forças Armadas, que numa grande percentagem do tempo os equipamentos estavam inoperacionais [16].

Com a diminuição dos custos de computação e com a facilidade de organizar bases de dados, começou-se a organizar registos sistemáticos das avarias por equipamento e componente. Desta forma, começaram a surgir técnicas de análise dos modos falha, que passaram a ser aplicados formalmente, seguindo procedimentos que facilitam o desenvolvimento dos equipamentos com vista a obter níveis de fiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança de acordo com o estabelecido.

2.2.1. Fiabilidade

Prever os acontecimentos nas mais diversas áreas, desde sempre foi um grande sonho e objectivo do ser humano. Na engenharia este sonho também não é excepção, já que as falhas ou avarias causam enormes problemas num ciclo produtivo ou em equipamentos críticos. A capacidade de prever é muitas vezes associada a algum poder superior. Todavia, desde meados do século XX, com o investimento e investigação na Engenharia começou a ser possível prever certas falhas. O estudo do comportamento dos materiais tornou possível estabelecer correlações entre ciclos ou tempos de utilização e a duração dos mesmos. De qualquer das formas, estas previsões não são de fácil obtenção, pois advêm da observação, registo e análise de eventos do passado. Felizmente, com a evolução da tecnologia e métodos é possível, hoje em dia, testar com rigor os comportamentos dos materiais ou componentes.

O conceito de fiabilidade no seu sentido lato está associado à ideia de operação bem-sucedida, ou de ausência de avarias, ou ainda de disponibilidade dos equipamentos [15]. No entanto, ao utilizar-se o termo fiabilidade em Engenharia, o significado tem um sentido mais restrito e mensurável. Segundo Bagowsky, a fiabilidade é a probabilidade de um sistema cumprir a sua função, dentro das condições

estabelecidas *a priori*, durante um intervalo de tempo, número de ciclos, e distância também estabelecidos [17].

Desta forma, a fiabilidade corresponde a uma probabilidade de sucesso, R , com uma probabilidade de Falha, F , complementar. (IPQ - Instituto Português da Qualidade, nomeadamente através da NP/EN 13306 - "Terminologia da Manutenção")

$$R + F = 1 \quad (2.1)$$

Sendo a fiabilidade uma probabilidade estimada a partir da experimentação, é necessário desde logo realizar um número suficiente de experiências, de forma a obter um valor médio expectável para a fiabilidade. Por não ser possível obter um valor exacto para a fiabilidade, não se poderá considerar como um evento determinístico, mas sim estocástico. Para um dado equipamento não será possível prever o número de horas ou ciclos de funcionamento antes de uma avaria, mas sim a probabilidade de não ocorrer avaria num certo intervalo de tempo ou número de ciclos de funcionamento [17].

Os fabricantes, por norma, realizam ensaios de forma a obter os valores de fiabilidade, com uma amostragem estabelecida. No entanto, estes ensaios, na maior parte dos casos, não simulam as condições reais de serviço e os valores de fiabilidade são por isso apelidados *fiabilidade inerente*, *intrínseca*, *previsional* ou também dita à *saída da fábrica*. Por outro lado, é possível tornar os valores mais próximos da realidade, reflectindo as reais condições de funcionamento. Para isso recorre-se à recolha de dados das avarias aquando das manutenções ou reparações do equipamento, sendo posteriormente necessário a recolha e tratamento dos dados. Este valor de fiabilidade é apelidado de fiabilidade demonstrada, extrínseca, operacional ou em serviço.

A função densidade de probabilidade ($f(t)$) é uma função de probabilidade instantânea de uma variável aleatória, que para o caso da manutenção representa a probabilidade instantânea de falha em t . Representa a taxa ou a percentagem de componentes que falham por unidade de tempo, no instante t , em relação ao número de componentes inicial da amostra N_0 [17].

Através do estudo do comportamento da função que representa a taxa de falha λ , que possui uma representação gráfica que se assemelha a uma banheira, podem ser identificados diferentes estados de vida de um sistema. Dado a forma da representação, esta figura ficou conhecida como "curva da banheira", que pode ser observada na Figura 3. Desta representação gráfica, é facilmente identificável três tipos distintos de comportamento, que representam os três tipos de fases da vida de um sistema.

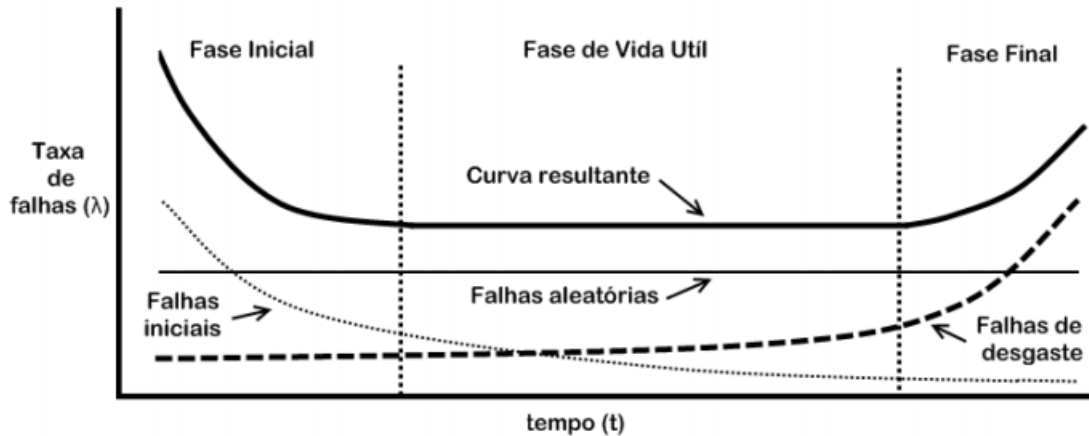


Figura 3: Gráfico "Curva da Banheira" [18].

Para descrever matematicamente o comportamento da função de fiabilidade, recorre-se a diversos tipos de distribuições, dependendo a escolha da fase de vida do sistema. Uma das mais utilizadas é a distribuição de Weibull, pois esta, através da variação de três parâmetros, pode descrever as várias fases da vida de um sistema. Outras distribuições, como a distribuição de Poisson, a distribuição exponencial e a distribuição normal, representam com rigor certas fases do ciclo de vida de um sistema [18].

A distribuição de Weibull, por depender de três parâmetros, permite o ajuste do comportamento da função com base na fase de vida a representar.

- **Parâmetro β :** este parâmetro é adimensional e representa os mecanismos de degradação dos componentes. Este é o parâmetro que permite aproximar a distribuição de Weibull às restantes distribuições utilizadas na manutenção [19].
 - $\beta < 1$, a função densidade de probabilidade representa a distribuição gama;
 - $\beta = 1$, a função densidade de probabilidade possui o comportamento da distribuição exponencial, com o valor da taxa de avaria dado por $\lambda = \frac{1}{\mu}$, onde μ representa o parâmetro de escala;
 - $\beta > 1$, a função densidade de probabilidade aproxima-se do comportamento da distribuição normal ($\beta=3,5$).

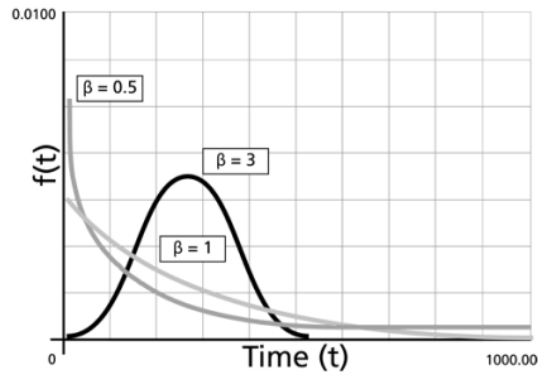


Figura 4: Comportamento da função densidade de probabilidade para diferentes valores de β [20].

O parâmetro β controla, também, o efeito da curva da taxa de avarias $\lambda(t)$. Com a variação deste parâmetro, é possível obter as diferentes etapas de vida. O gráfico da “curva da banheira” é desta forma obtido. Na Figura 5, é possível verificar o comportamento do parâmetro de forma na função da taxa de avaria.

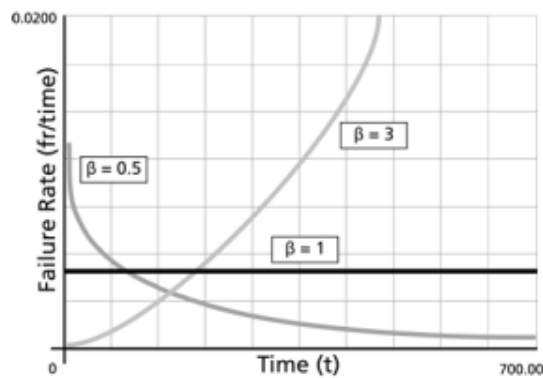


Figura 5: Efeito do parâmetro de forma, na taxa de avaria $\lambda(t)$ [20]

- **Parâmetro η :** O parâmetro η corresponde ao tempo de vida de um componente, ajustado de forma à função densidade de probabilidade corresponder aos dados.

A Figura 6 representa graficamente o comportamento da função densidade de probabilidade para diferentes valores de η e com β constante [19].

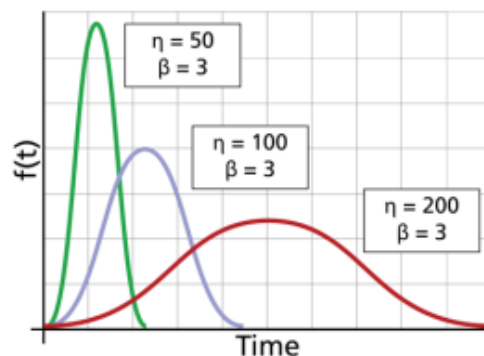


Figura 6: Efeito do parâmetro de escala η , na função densidade de probabilidade $f(t)$ [20].

- **Parâmetro γ :** O parâmetro γ é conhecido como o parâmetro de localização e corresponde ao deslocar da distribuição da densidade de probabilidade $f(t)$ ao longo do eixo do tempo.
 - $\gamma < 0$, a função densidade de probabilidade desloca-se para a direita revelando que não existem falhas nos componentes até se alcançar o instante γ ;
 - $\gamma = 0$, a função densidade de probabilidade começa na origem do referencial ($t=0$). Desta forma a função corresponde à função densidade de probabilidade de Weibull de dois parâmetros. Considera-se que existe a hipótese de falha desde o início;
 - $\gamma > 0$, a função densidade de probabilidade desloca-se para a esquerda e revela que existe a hipótese de ocorrerem falhas antes da entrada do componente em serviço. É utilizado quando se considera a possibilidade de o componente falhar durante a fase de produção, embalagem, armazenamento, transporte ou teste.

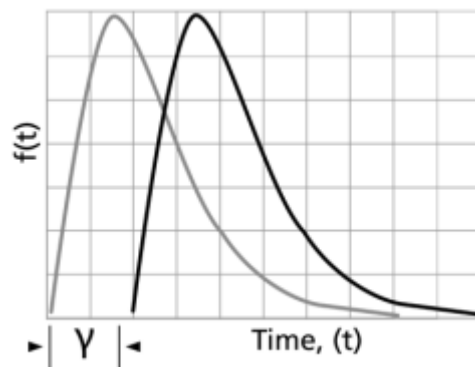


Figura 7: Efeito do parâmetro de localização γ , na função densidade de probabilidade $f(t)$ [20].

A primeira fase é a falha precoce. Nesta fase, as avarias devem-se principalmente a montagens e instalações mal efectuadas, problemas de projecto ou problemas no fabrico. O estudo desta fase não representa por norma grande interesse para o estudo dos valores de fiabilidade, podendo ser apenas necessário estudar o seu comportamento em casos especiais. Nesse caso, a distribuição de Weibull é a que representará o comportamento, utilizando para isso valores de $0 < \beta < 1$ [15].

A fase de vida útil é a fase mais relevante para o estudo dos procedimentos de manutenção. Nesta etapa, a taxa de avaria é constante o que permite simplificar o seu estudo. As falhas que possam surgir não são possíveis de atribuir a nenhuma causa a não ser a causas aleatórias. Aquando do instante T_u a fase de vida útil termina. Este instante representa, do ponto de vista da manutenção, o ponto óptimo para a substituição dos componentes.

A distribuição mais utilizada para representar esta fase é a distribuição exponencial negativa.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, t > 0 \quad (2.2)$$

No decorrer da fase de vida útil, as funções densidade de probabilidade (2.3), fiabilidade (2.2) e risco (2.4) representam-se como o ilustrado na Figura 8. [17]

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \text{ e } f(t) = 0, t < 0 \quad (2.3)$$

$$h(t) = \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{MTBF} \quad (2.4)$$

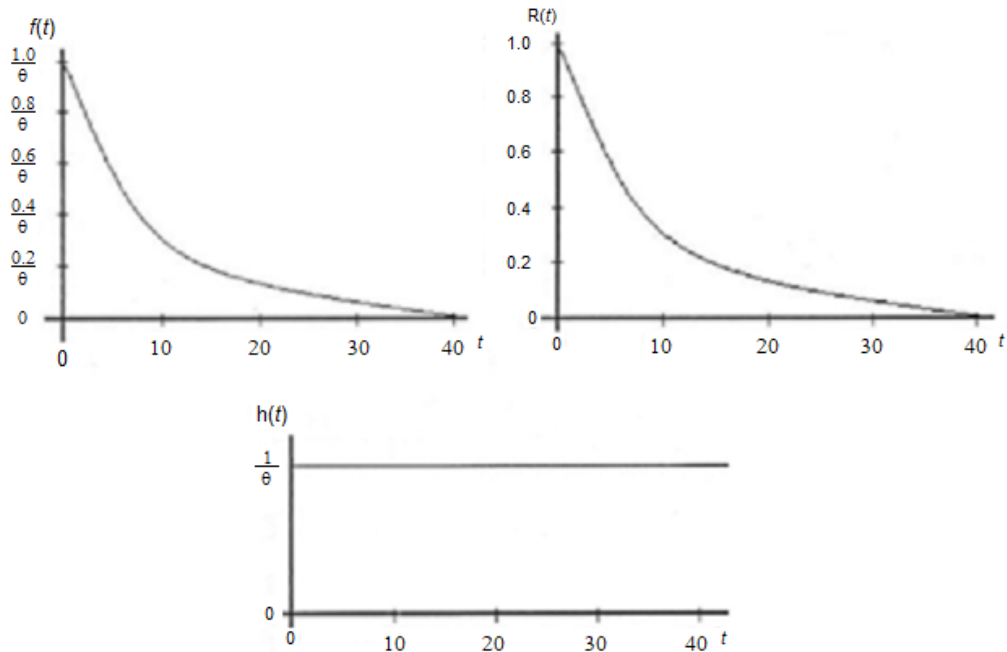


Figura 8: Gráficos representativos da distribuição exponencial negativa das funções densidade de probabilidade, fiabilidade e taxa de falha ou risco em função do tempo. [21]

Na fase de desgaste ocorre um aumento da taxa de avaria. As causas são principalmente o envelhecimento e o desgaste dos componentes. Por esse motivo, esta fase é de evitar, pois poderá significar paragens não programadas do sistema em períodos críticos e também provocar avarias em sistemas subjacentes por avarias catastróficas [22].

A distribuição normal, como é possível verificar através do comportamento da curva da taxa de avaria, representa com rigor o seu comportamento na fase de desgaste. Ao chegar ao tempo T_u dá-se então o começo desta fase, em que o valor irá crescer acentuadamente até um valor médio T_m , voltando a dar-se uma descida acentuada no valor da taxa de avaria.

Esta distribuição é caracterizada por um valor médio de distribuição μ (parâmetro de localização) e a variância σ^2 (parâmetro de escala). As funções densidade de probabilidade (2.5), fiabilidade (2.6) e risco (2.7) encontram-se representadas na Figura 9 [21].

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.5)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.6)$$

$$h(t) = \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.7)$$

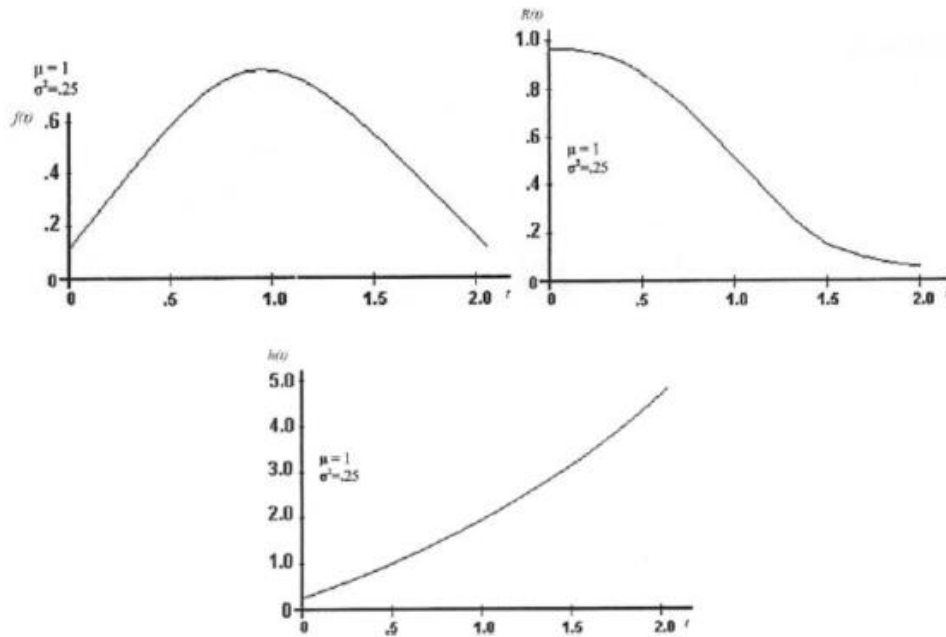


Figura 9: Gráficos representativos da distribuição Normal das funções densidade de probabilidade, fiabilidade e taxa de falha ou risco em função do tempo [21]

Na Figura 9, é ainda possível analisar graficamente as causas a que se devem as variações da taxa de avaria ao longo do tempo de vida de um sistema ou componente. De notar que as causas aleatórias contribuem para a taxa de avaria de forma constante ao longo do ciclo de vida. As variações ao longo do tempo são, desta forma, devidas às falhas iniciais e às falhas de desgaste. Durante a fase de vida útil, estes dois tipos de falhas anulam-se mutuamente, tornando a taxa de avaria constante nesta fase de vida.

2.2.2. Disponibilidade

A Disponibilidade pode ser definida como a aptidão para um material cumprir a função durante um tempo especificado [17].

Este critério engloba as noções de fiabilidade e de manutenibilidade, fornecendo uma medida da eficiência com que o sistema se encontra [16]. Genericamente, a disponibilidade relaciona o tempo efectivo de serviço com o tempo total de vida de um sistema ou componente, incluindo os tempos em falha e em reparação. A disponibilidade é calculada pela fórmula representada em baixo [23].

$$\text{Disponibilidade } (D) = \frac{T_{\text{serviço}}}{T_{\text{total serviço}}} \quad (2.8)$$

Para o estudo da disponibilidade é importante conhecermos alguns factores, a saber:

- Tempo médio entre falhas (MTBF);
- Tempo médio até à falha (MTTF), tempo médio até à primeira falha;
- Tempo médio de reparação - (MTTR);
- Tempo médio em espera (MWT), que representa o tempo entre o momento em que o sistema entra em falha e o momento em que começa a reparação;
- Tempo médio de paragem (MDT), que representa o somatório entre o tempo médio de reparação e o tempo médio em espera.

A figura seguinte pretende, de forma simplificada, exemplificar graficamente os vários factores presentes no estudo da disponibilidade, dado que por vezes as várias variáveis podem ser confundidas entre si.

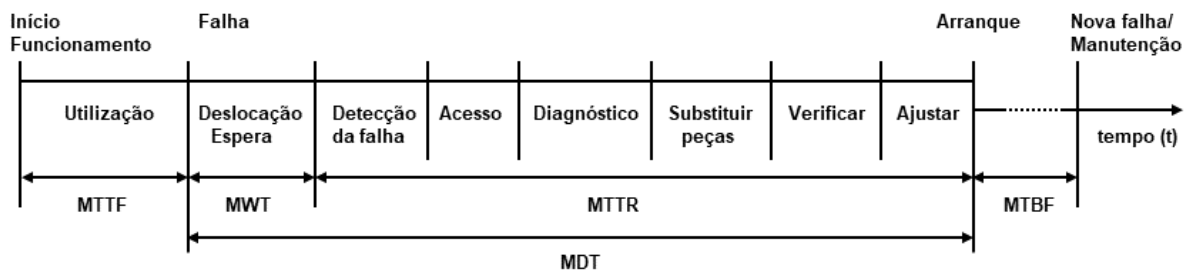


Figura 10: Representação Ciclo de Vida de um Sistema/Componente

$$D = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR + MWT} \quad (2.9)$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MWT} \quad (2.10)$$

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad (2.11)$$

Na maior parte das estratégias de gestão da manutenção pretende-se obter um valor de disponibilidade elevado. Não só por normalmente representar custos finais menores, mas também por aumentar qualidade do serviço, a confiança do cliente no equipamento e também a imagem de qualidade da marca do equipamento. Os tempos de paragem são menores, pois os tempos em espera e de reparação serão menores. Podem ser até programados para alturas não produtivas ou períodos onde o equipamento não seja utilizado.

2.2.3. Manutenibilidade

A manutenibilidade é definida como rapidez e facilidade com que a manutenção pode ser executada. É medida por MTTR (tempo médio para reparar). Este é o parâmetro mais utilizado, no entanto existem outros parâmetros também importantes que facilitam a análise e o planeamento das acções de manutenção. A manutenibilidade é uma característica do design e da instalação, que expressa a probabilidade e um sistema voltar a actuar, como é esperado num determinado período, quando sujeito a uma manutenção que utiliza procedimentos e recursos pré-definidos (MIL-STD-778).

Os parâmetros mais relevantes para a manutenibilidade estão relacionados com os tempos de paragem, a saber [23]:

- Tempo médio de paragem para manutenção correctiva (MCDT);
- Tempo médio de paragem para manutenção preventiva (MPDT);
- Tempo médio de paragem (MDT).

De forma a ser garantido um elevado nível de manutenibilidade, os seguintes factores devem ser tomados em conta na fase de projecto:

- A facilidade de montagem e afinação;
- A intermutabilidade dos componentes susceptíveis de desgaste;
- A normalização dos sistemas e componentes;
- A possibilidade de inspecção, verificação e controlo dos componentes.

Uma vez que os requisitos de operação do sistema estejam definidos, deve ser feita uma análise que permita avaliar a manutenibilidade. Desta forma, alterações podem ser feitas pelos projectistas numa fase inicial, de forma a que as falhas sejam suprimidas no sistema final.

A manutenibilidade está fortemente relacionada com a disponibilidade de um dado sistema. Sendo que a manutenibilidade será tanto maior quanto menor for o tempo médio de reparação (MTTR), e por sua vez maior a disponibilidade do sistema. ~

2.2.4. Ciclo RAM

Na tentativa de minimizar estes riscos e aumentar a fiabilidade dos equipamentos, importa haver um investimento pensado desde as especificações do componente/produto até ao projecto do mesmo. Um compromisso entre a redução da taxa de avarias e os custos envolvidos nessa redução.

O ciclo RAM pretende facilitar e permitir a integração dos objectivos de fiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança, de maneira a garantir a performance no serviço por parte do equipamento [15].

A Figura 11 pretende esquematicamente, representar a ligação entre as etapas habituais do desenvolvimento de produto e da análise RAM (Smith, 2005).

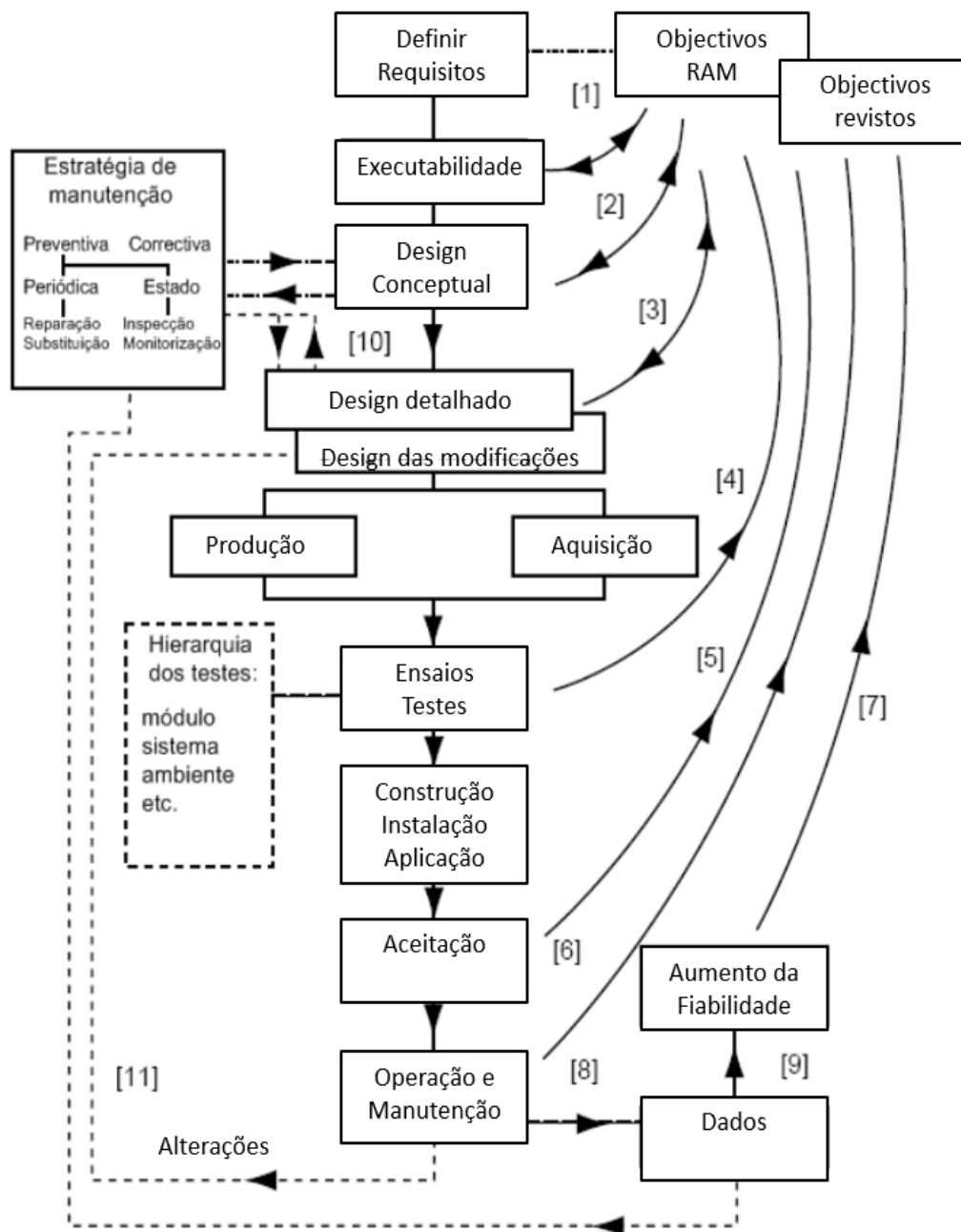


Figura 11: Ciclo RAM (Adaptado de Ciclo RAMS [15])

O ciclo RAM é composto por onze miniciclos e definem-se da seguinte forma:

- [1] - Comparação da exequibilidade RAMS do sistema com os objectivos iniciais;
- [2] - Comparação das previsões RAM de projecto com os objectivos RAM;
- [3] - Comparação do projecto detalhado com os objectivos RAM;
- [4] - Comparação entre os resultados dos testes RAM na fase de desenvolvimento e de projecto;

[5] - Comparação entre a qualidade de construção/installação do sistema e a sua conformidade com os objectivos RAM;

[6], [7] e [8] - Análise do desempenho do sistema, quer em termos de operação quer de manutenção, com os objectivos RAM;

[9] e [11] - Representam a recolha e análise dos dados de forma a permitir o melhoramento das estratégias de manutenção e conseqüentemente o aumento da fiabilidade.

[10] - Interligação entre as necessidades de reflectir as estratégias de manutenção na fase de projecto.

Nem sempre é possível aplicar o ciclo completo por questões de falta de tempo ou de força humana. No entanto, se o ciclo for aplicado por completo, há uma garantia de que todas as componentes do projecto estão em consonância e, à partida, a maioria dos problemas foram suprimidos ou pelo menos são conhecidos.

2.2.5. Tipos de Manutenção

Com o decorrer do estudo da manutenção, classificou-se as diversas estratégias de manutenção em cinco tipos. Na Figura 12, é possível obter uma visão geral dos vários tipos de manutenções, bem como as suas subdivisões [24].

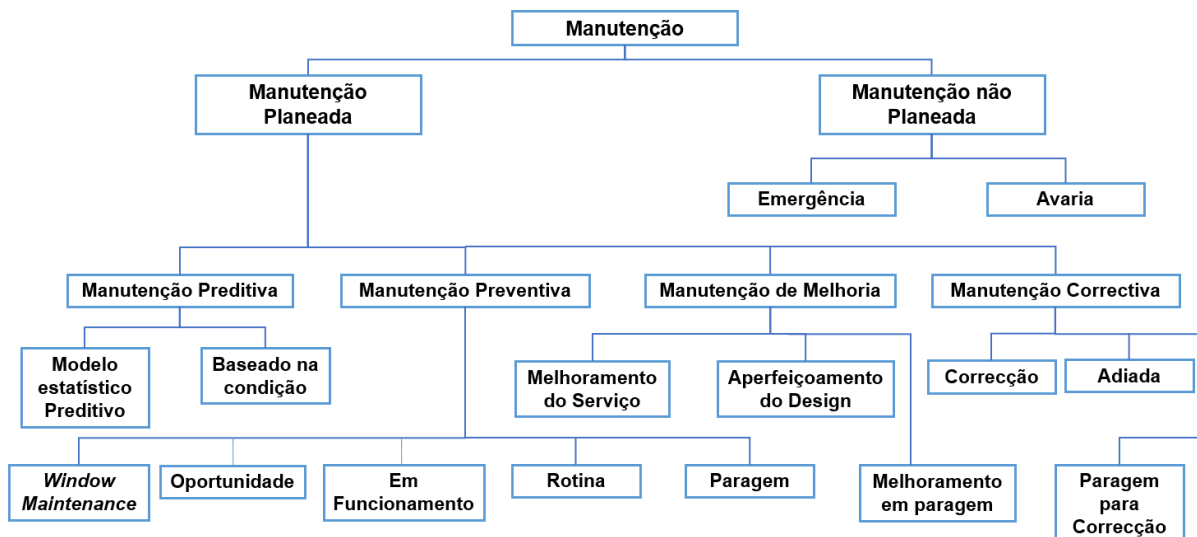


Figura 12: Fluxograma diferentes tipo de manutenção

2.2.5.1. Funcionamento até à falha (RTF)

Este é o tipo de estratégia de manutenção mais antiga. Neste tipo de manutenção, os sistemas são reparados ou substituídos depois da ocorrência de uma falha ou avaria de forma a que o sistema volte ao activo na sua condição de serviço mínima estabelecida.

Está dividida em dois tipos:

- Manutenção de emergência: é realizada o mais rapidamente possível de forma, pois pode comprometer a segurança do sistema;
- Manutenção após avaria: é realizada após uma avaria complexa para a qual foi feito um aprovisionamento de peças, mão-de-obra e equipamento.

No entanto, este tipo de manutenção, por exigir pouco planeamento, possui algumas desvantagens, a saber:

- Os custos directos e indirectos são elevados, devido à falta de preparação;
- Frequentemente aplicando este tipo de manutenção, aquando de uma falha, provoca falhas em cadeia. Desta forma, a disponibilidade reduz-se dado que a reparação total irá requerer mais tempo e será mais dispendiosa.

No entanto, em certas circunstâncias este tipo de manutenção pode ser a mais indicada, a saber:

- Em sistemas em que a falha é imprevisível;
- O custo de implementação das actividades de manutenção programada é elevado;
- Em caso de falha é impossível a propagação da falha para outros sistemas subsequentes;
- Em sistemas pouco complexos.

2.2.5.2. Manutenção Correctiva (CM)

A manutenção correctiva é uma evolução da manutenção RTF. Existe um estudo prévio e planeamento dos procedimentos de manutenção, antes que a peça seja colocada em serviço.

Este tipo de manutenção está dividido em três tipos:

- Manutenção adiada: São as acções de manutenção correctivas que são adiadas ao máximo, sem que haja paragem dos sistemas ou que possam comprometer o processo produtivo.
- Manutenção de correcção: São realizadas acções de manutenção de forma a reparar o sistema, sem que haja a paragem do equipamento ou processo produtivo;
- Paragem para manutenção correctiva: representa as acções de manutenção que são efectuadas quando o equipamento não se encontra em serviço ou numa situação de paragem completa.

O principal objectivo da manutenção correctiva é maximizar a efectividade do sistema, eliminando paragens completas forçadas e a eliminação de manutenções desnecessárias.

A grande diferença entre a manutenção correctiva e a RTF é que as acções são pensadas e planeadas de forma a manter a disponibilidade elevada, sem afectar o tempo de serviço ou ciclo produtivo.

Os passos principais na utilização de uma estratégia de manutenção correctiva devem ser os seguintes:

- Detecção da falha;
- Isolar a causa da falha;
- Eliminar/corrigir a falha;
- Verificar o sistema em funcionamento após a correcção da falha.

2.2.5.3. Manutenção Preventiva (PM)

Com a evolução do conhecimento do comportamento dos sistemas, tornou-se possível aplicar modelos probabilísticos de gestão da manutenção que permitem prever o comportamento e estado de vida dos equipamentos.

A manutenção preventiva propõe que se realizem manutenções em intervalos programados, antes que as falhas ocorram, de forma a evitar falhas catastróficas de sistemas e em situações de trabalho críticas ou tempos de trabalho produtivos. O princípio adjacente a este tipo de manutenção está relacionado com o ditado popular “É melhor prevenir do que remediar”.

A principal diferença entre a manutenção preventiva e a manutenção correctiva é que, na manutenção preventiva, a acção de mitigação da falha ocorre antes da existência da própria falha.

Para a aplicação deste tipo de manutenção é necessário que o MTBF siga uma distribuição normal em relação à frequência de falhas.

O procedimento para implementar a estratégia de manutenção preventiva deve seguir os seguintes passos:

- À partida devem ser estudados e conhecidos os pontos fracos do sistema;
- Estudo do comportamento da variável do tempo médio entre falhas MTBF;
- Definição das verificações/inspecções/substituições periódicas de forma a antecipar falhas e paragens forçadas.

A manutenção preventiva pode ser dividida em cinco tipos:

- Manutenção de Rotina: São as acções de manutenção periódicas, tais como limpeza, lubrificação e afinações aos sistemas;
- Manutenção em funcionamento: São as acções de manutenção efectuadas enquanto o equipamento se encontra em funcionamento, de forma a preparar os vários sistemas para os processos de manutenção preventiva aquando da paragem do equipamento;

- Manutenção de Oportunidade: são as acções de manutenção realizadas quando surge uma oportunidade não planeada, durante a fase de manutenção planeada de outros equipamentos adjacentes;
- *Window Maintenance*: são as acções realizadas quando o equipamento não está a ser utilizado por um certo período de tempo;
- Paragem para manutenção preventiva: representa o conjunto de actividades de manutenção, quando há uma paragem completa do sistema ou ciclo produtivo.

A manutenção preventiva possui um grande leque de vantagens, a saber:

- Redução das falhas e consequentemente os tempos de paragem;
- Aumento da segurança, especialmente em situações críticas;
- Custos de reparação potencialmente menores;
- A tarefa de gestão de stocks de peças e de equipamentos fica facilitada;
- Aumenta a confiança no equipamento por parte do cliente;

2.2.5.4. Manutenção de Melhoria (IM)

A manutenção de melhoria pretende reduzir ou eliminar por completo a necessidade de ser realizado qualquer tipo de actividade de manutenção.

A manutenção de melhoria está dividida em três tipos de actividades, a saber:

- Manutenção por aperfeiçoamento do design: conjunto de actividade que permitem simplificar as tarefas de manutenção, eliminando as causas das falhas. Por norma é proposto um novo projecto para o equipamento ou sistema, de forma a aumentar a fiabilidade dos mesmos. Os custos por paragens ou por reparação/substituição são desta forma suprimidos.
- Melhoramento do serviço: inclui a modificação ou construção de equipamentos adjacentes, que tornam o equipamento ou processo mais robusto.
- Manutenção por melhoramento em paragem: representa as acções de melhoramento introduzidas aquando de uma paragem total do sistema produtivo ou do equipamento.

2.2.5.5. Manutenção Preditiva (PDM)

Com a evolução da tecnologia e da instrumentação, tornou-se possível dotar os equipamentos de sensores que possibilitam a detecção de falhas, através de uma análise constante de uma variável crítica. [24]

Desta forma, apenas quando existe a detecção de um parâmetro fora dos valores recomendados de serviço, é dado um aviso para que a correcção/substituição do sistema/componente possa ocorrer antes de a falha ocorrer.

Por vezes, a manutenção preditiva é confundida com a manutenção preventiva, pois em ambas é realizada a substituição/reparação do sistema antes que exista uma falha. No entanto, a manutenção preditiva requer a constante monitorização de várias variáveis de processos ou de funcionamento, ao passo que a manutenção preventiva se baseia num modelo estatístico de falhas.

A manutenção preditiva divide-se em dois métodos que dependem da forma como são detectados os sinais de falha, a saber:

- Manutenção preditiva, com base no estado da variável em análise, que é registada continuamente até que existam sinais de falha;
- Modelo de manutenção preditivo, com base na recolha de dados em tempo real, de forma a criar um modelo estatístico de previsão de falhas.

2.2.6. Custos da manutenção

De forma a tornar qualquer empresa competitiva os custos de manutenção devem ser analisados. A escolha da estratégia de gestão da manutenção deve ser ajustada ao equipamento ou processo a ser aplicado.

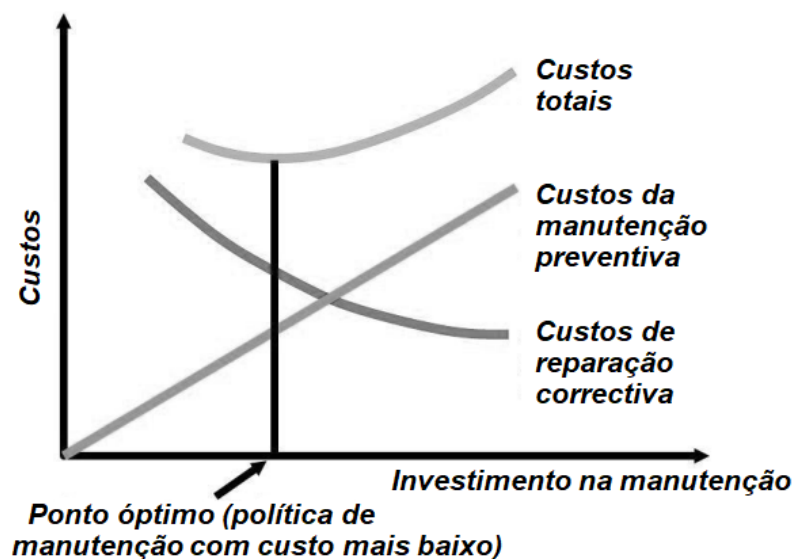


Figura 13: Visão Tradicional dos custos de manutenção (adaptado de [24]).

Como é possível verificar na Figura 13, os custos de manutenção totais apresentam um valor mínimo, que representa o compromisso óptimo entre estratégias de manutenção preventiva e estratégias de manutenção por paragens forçadas devido a avarias. No entanto, apenas estão representados os custos de manutenção após uma falha. Adicionalmente é necessário considerar os custos por o sistema não estar num estado produtivo. Para além destes poderíamos ainda considerar os custos de imagem para a empresa/marca que produz e vende o equipamento.

Desta forma, o ponto óptimo do custo de manutenção altera-se, tornando as estratégias de manutenção preventiva mais importantes e o total dos custos de avaria menores, como é possível verificar na Figura 14.

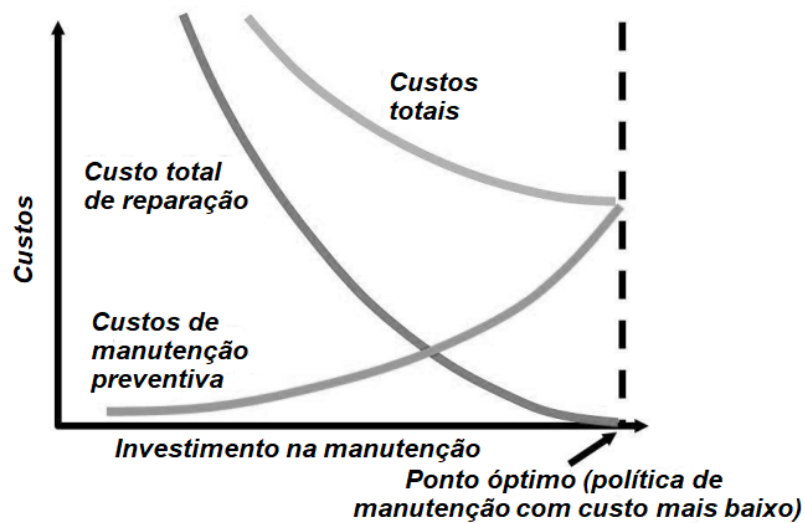


Figura 14: Visão Total dos custos de manutenção (adaptado de [24]).

2.3. Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)

O método Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) é o complemento do método Failure Modes Effects and Analysis (FMEA). Este complemento acrescenta ao processo a análise da criticidade da falha identificada pelo FMEA. Na análise da criticidade é atribuído um grau de importância a cada falha identificada, de modo a que seja possível decidir quais as falhas mais críticas, que serão sujeitas a uma análise aprofundada.

Este método é capaz de estudar, de forma sistemática, os vários modos de falha, de um determinado componente, as suas causas e os seus efeitos no funcionamento e segurança do sistema (Sobral & Abreu, 1999).

É impossível determinar exactamente quando um sistema estará em falha, pelo que o objectivo deste método é conseguir determinar quais os componentes de um sistema que são menos fiáveis ou têm uma elevada importância para o funcionamento ou segurança. Assim, logo que exista essa identificação é possível modificar o sistema ou melhorar os planos de manutenção [25].

Para Stamatis [26], esta é uma técnica de engenharia utilizada para eliminar falhas, problemas, erros de um sistema, erros de projecto e erros de processo ou de serviço antes que estes cheguem aos utilizadores.

A análise FMECA deve ser realizada primeiramente na fase de design do equipamento. A documentação produzida pela análise FMECA não só é benéfica no trabalho preliminar de design, mas também ao longo do ciclo de vida do equipamento. À medida que mais informação é recolhida no decorrer do funcionamento do equipamento, a documentação deve ser actualizada de modo a beneficiar os procedimentos de manutenção, verificação de falhas e futuros melhoramentos ou novos produtos [27].

2.4. Corrosão

2.4.1. Introdução

A Corrosão é um processo de deterioração de um material, devido à reacção com o ambiente, por acção não exclusivamente mecânica. É também a oxidação de um metal, num processo químico oposto ao da extracção metalúrgica, como representado na Figura 15. [28]

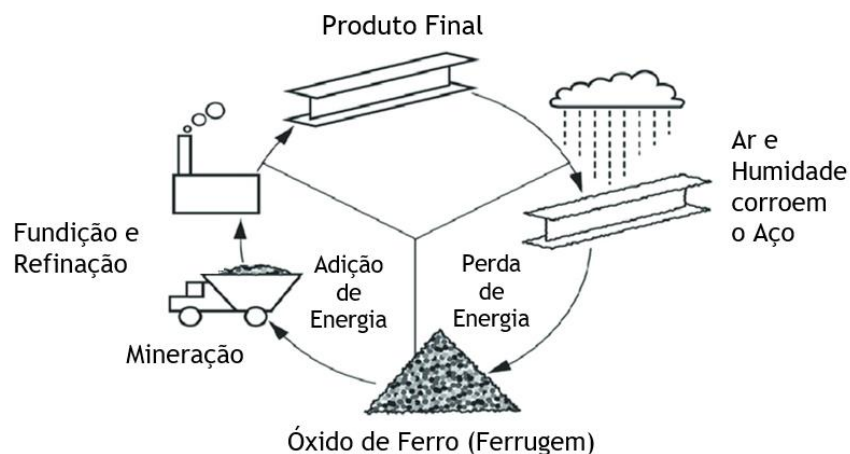


Figura 15: Ciclo de Corrosão (Adaptado de [29]).

A corrosão metálica pode ser dividida em dois grandes grupos:

- Corrosão húmida: que envolve a existência de soluções aquosas ou de electrólitos;
- Corrosão seca: não existem soluções em fase líquida ou o processo ocorre acima do ponto de orvalho envolvidas no processo de corrosão.

A Corrosão é um processo que implica alguns problemas:

- Económico: originam custos elevados de substituição e reparação de equipamentos e materiais;
- Tecnológico: a existência do processo de corrosão limita a selecção de materiais nos processos tecnológicos;
- Social: pode originar problemas ou acidentes que ponham em causa a vida humana.

As reacções electroquímicas envolvem variação de valência dos elementos e dão-se à mesma velocidade na ausência de potencial imposto [30].

Para o caso do ferro (Fe) em meio neutro oxigenado as reacções apresentam-se abaixo.

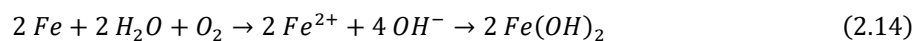
- Equação reacção anódica (oxidação):



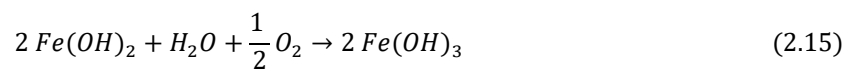
- Equação reacção catódica (redução):



- Equação reacção global:



No entanto, na maior parte das vezes o hidróxido de ferro Fe(II) é oxidado originando o hidróxido de Fe(III), reacção presente na equação (2.15).



O Zinco por sua vez oxida-se

2.4.2. Corrosão Galvânica

A corrosão galvânica denomina o processo corrosivo resultante do contacto eléctrico de materiais dissimilares, na presença de um electrólito. O processo de corrosão será tanto mais favorável do ponto de vista termodinâmico, quanto maior for a diferença de potencial entre ambos os metais. Esta diferença de potencial é a força motriz para a geração de um fluxo de electrões entre os metais.

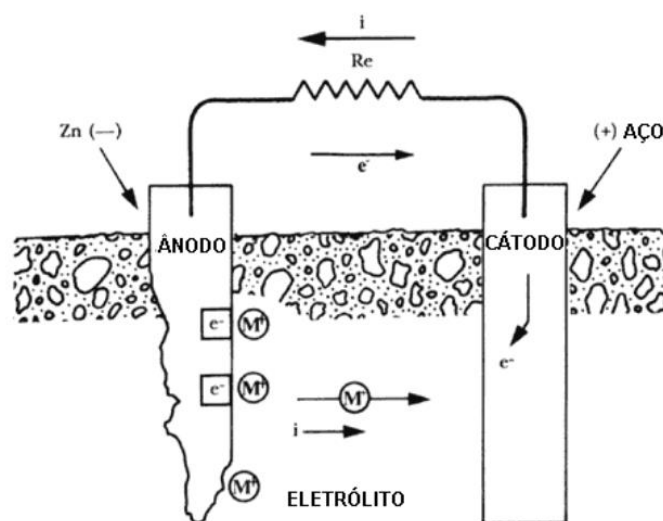


Figura 16: Corrosão Galvânica

A corrosão do metal menos nobre aumenta, enquanto a corrosão do metal mais nobre diminui, comparando-se com o comportamento que teriam quando não ligados entre si. Forma-se uma célula

galvânica, i.e., uma célula electroquímica que consome materiais gerando simultaneamente corrente eléctrica entre dois metais expostos e em contacto eléctrico (eléctrodos). O eléctrodo que se oxida é apelidado de ânodo e aquele onde se dá a redução é apelidado de cátodo.

De forma a seriar os diferentes metais e ligas e prever as relações de potencial entre os metais, surge a série galvânica. A série galvânica é utilizada em engenharia, pois é feita a seriação das diferenças de potencial entre as diferentes ligas utilizadas nas construções e produtos desenvolvidos na engenharia.

Os valores de potencial variam consoante a composição do meio e da temperatura, pelo que normalmente na tabela geral da série galvânica não são apresentados valores de potenciais para cada metal, sendo que o mais relevante é a posição relativa dos metais ou ligas entre si. Os valores de potencial são obtidos desta forma para casos específicos.

↑ Noble or cathodic	Platinum
	Gold
	Graphite
	Titanium
	Silver
	Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	18-8 Mo stainless steel (passive)
	18-8 stainless steel (passive)
	Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive)
	Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Nickel (passive)
	Silver solder
	Monel (70 Ni, 30 Cu)
	Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)
Bronzes (Cu-Sn)	
Copper	
Brasses (Cu-Zn)	
Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)	
Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)	
Inconel (active)	
Nickel (active)	
Tin	
Lead	
Lead-tin solders	
18-8 Mo stainless steel (active)	
18-8 stainless steel (active)	
Ni-Resist (high Ni cast iron)	
Chromium stainless steel, 13% Cr (active)	
Cast iron	
Steel or iron	
2024 aluminum (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)	
Cadmium	
Commercially pure aluminum (1100)	
Zinc	
Magnesium and magnesium alloys	
↓ Active or anodic	

Figura 17: Série Galvânica de alguns metais e ligas comerciais em água do mar [30]

Um aspecto interessante da Figura 17, é que para os metais envolvidos dentro das chavetas o risco de colocá-los ligados representa um risco baixo de corrosão galvânica. A diferença de potenciais entre

esses metais é muito diminuta pelo facto de as ligas serem compostas por elementos muito semelhantes.

Material	Steady-state electrode potential, volts (Saturated Calomel Half-Cell)
Zinc	-1.03
Aluminum 3003-(H)	-0.79
Aluminum 6061-(T)	-0.76
Cast iron	-0.61
Carbon steel	-0.61
Stainless steel, Type 430, active	-0.57
Stainless steel, Type 304, active	-0.53
Stainless steel, Type 410, active	-0.52
Naval rolled brass	-0.40
Copper	-0.36
Red brass	-0.33
Bronze, Composition G	-0.31
Admiralty brass	-0.29
90Cu-10Ni, 0.82Fe	-0.28
70Cu-30Ni, 0.47Fe	-0.25
Stainless steel, Type 410, passive	-0.22
Bronze, Composition M	-0.23
Nickel	-0.20
Stainless steel, Type 410, passive	-0.15
Titanium (a)	-0.15
Silver	-0.13
Titanium (b)	-0.10
Hastelloy C	-0.08
Monel-400	-0.08
Stainless steel, Type 410, passive	-0.08
Stainless steel, Type 316, passive	-0.05
Zirconium (C)	-0.04
Platinum (C)	+0.15

Figura 18: Valores de Potencial entre metais e Eléctrodo de Referência de Calomelanos saturado (ECS) em água salgada [31].

Na Figura 18 é possível verificar os valores dos potenciais eléctricos para diferentes metais e ligas utilizados em engenharia, em referência a um eléctrodo de referência de Calomelanos saturado (ECS). Uma das regras de bolso utilizada na indústria é a de não utilizar materiais com uma variação de mais de 200 mV entre si, de forma a reduzir a corrente galvânica [32].

2.4.3. Métodos de Protecção contra a Corrosão

2.4.3.1. Protecção Catódica

A protecção catódica é um método que pretende diminuir a velocidade de corrosão de um componente ou equipamento, que se encontre banhado por um electrólito. Consiste em utilizar os princípios das células electroquímicas, de forma a tornar o material a proteger no cátodo.

A protecção catódica é alcançada através do fluxo de electrões fornecido ao componente ou sistema a proteger. De forma a fornecer o fluxo de electrões necessários à protecção catódica podem ser utilizados dois métodos:

- Corrente imposta: neste caso, através de uma fonte de alimentação de corrente contínua, é fornecida corrente através do terminal negativo à estrutura a proteger. O terminal positivo é ligado a um eléctrodo inerte, normalmente de grafite.

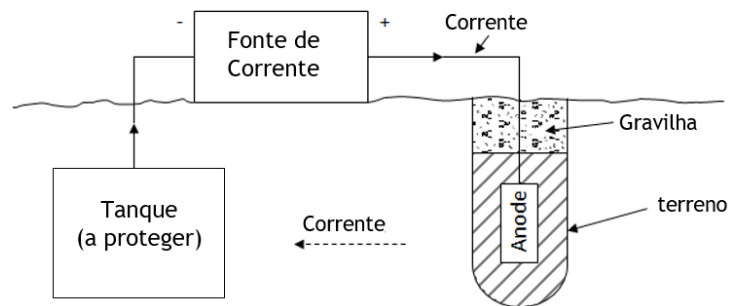


Figura 19: Protecção catódica por corrente imposta aplicado a um tanque subterrâneo (Adaptado de [30])

- Ânodo de Sacrifício: no caso da protecção por ânodo de sacrifício é ligado ao componente a proteger, um metal menos nobre. Este método de protecção baseia-se no fenómeno da corrosão galvânica. A tabela da série galvânica é utilizada de forma a seleccionar o metal a ligar.

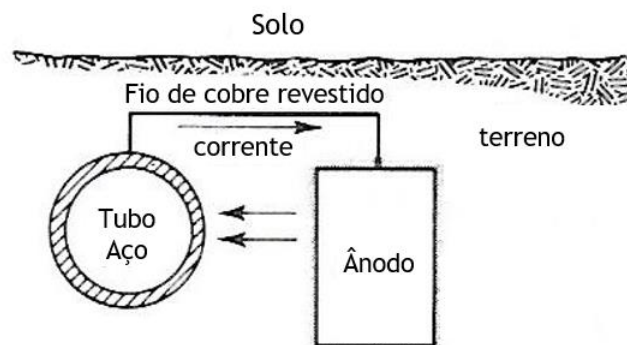
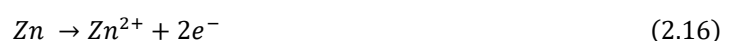
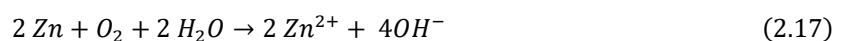


Figura 20: Protecção de um tubo de aço com um ânodo de sacrifício de magnésio (Adaptado de [30]).

Um dos exemplos mais comuns é a protecção de equipamentos em aço com a utilização de um ânodo de zinco. Neste caso o zinco oxida-se (eq.2.16) fornecendo uma dada corrente de protecção ao aço.



A reacção catódica dá-se predominantemente no aço e é a redução do oxigénio (eq.2.13), a velocidade das duas reacções é a mesma e a equação global da reacção é (eq.2.17).



2.4.3.2. Potencial para Protecção Catódica

De forma a existir protecção catódica é necessário manter o potencial do equipamento entre um certo valor, sendo que este intervalo de valores varia com o electrólito utilizado entre os dois metais. O potencial é normalmente medido utilizando um eléctrodo de referência.

Conhecendo a série galvânica dos metais para o meio em questão, é possível seleccionar um ânodo de sacrifício de um metal mais activo do que o metal a proteger. Ao ligarmos electricamente os dois metais, mantendo-os no mesmo electrólito, o potencial referente ao eléctrodo de referência irá baixar. Existirá uma diferença de potencial entre o ânodo e o equipamento, que dará origem a um fluxo de corrente que protegerá o equipamento. O desvio do potencial para valores mais negativos de potencial (polarização catódica), irá aumentar a corrente entre os dois metais.

Como referido, o potencial deve ser mantido dentro de certos valores para que exista protecção, mas que por outro lado não exista sobre protecção. De forma a calcular-se o intervalo óptimo de protecção é necessário recorrer aos diagramas de Pourbaix. O diagrama de Pourbaix apresenta as reacções e os produtos das reacções, que ocorrem quando em equilíbrio para diferentes valores de pH e de potencial imposto ao elemento. A Figura 21, representa o diagrama de Pourbaix para o Ferro em água, sobreposto ao diagrama para água e o oxigénio. Ao baixar-se o potencial a baixo da linha a tracejado azul inferior, estaremos a provocar a redução da água (equação 2.18) com geração H_2 e alcalinização do electrólito. A alcalinização do meio e a geração H_2 poderá provocar o desprendimento da pintura. A este excesso de protecção é dado o nome de sobre protecção do metal.

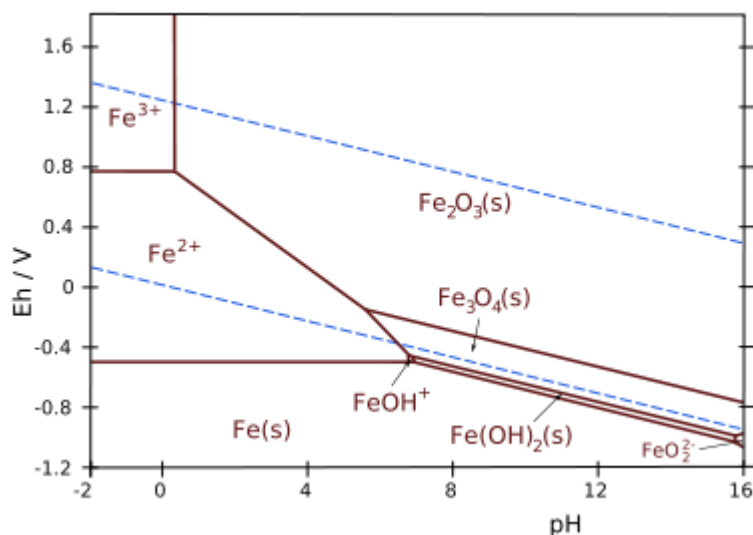


Figura 21: Diagrama de Pourbaix do Ferro à concentração iónica de 1.0 mM [33].

A Yamaha recomenda que o potencial entre o motor/barco e um eléctrodo de referência deve estar entre os -800 mV e os -1000mV, de forma a que o conjunto se encontre protegido eficazmente contra os efeitos da corrosão galvânica [34].

2.4.3.3. Valores típicos de densidade de corrente para protecção catódica

Na Tabela 1 apresentam-se as propriedades e características dos ânodos de sacrifício mais utilizados. O valor da densidade de corrente apresentado nesta tabela refere-se a um valor obtido com o fluido parado.

Tabela 1: Propriedades dos ânodos de sacrifício (Adaptado de [35]).

Material ânodo	$i_{\text{ânodo}} \text{ (A/m}^2\text{)}$
Zn	0,5 - 2
Al	0,6 - 2,5
Mg	1,5 - 5,6

Na Tabela 2 apresentam-se os valores de densidade de corrente necessários para a protecção do aço em certos ambientes, nomeadamente na água do mar. Os valores foram obtidos em condições em que o fluido estava parado.

Tabela 2: Densidade de corrente necessária para a protecção do aço em certos ambientes (Adaptado de [35]).

Ambiente	$i_{\text{cátodo}} \text{ (A/m}^2\text{)}$
Soluções ácidas	350 - 500
Soluções salinas	0,3 - 10
Água do mar	0,05 - 0,15
Lama salina	0,025 - 0,05

2.4.3.4. Protecção Anódica

A protecção anódica é um método de prevenção dos efeitos da corrosão, que consiste em aplicar corrente eléctrica no equipamento ou estrutura a proteger. A corrente que é imposta provoca a passivação do material aumentando a sua resistência à corrosão.

No entanto, este tipo de protecção só pode ser aplicado em metais ou ligas que formem películas de óxidos estáveis. Esta película irá proteger o metal imediatamente abaixo.

Para a manutenção desse estado de passivação é necessário utilizar um potencióstato, que irá manter um potencial constante em relação a um eléctrodo de referência.

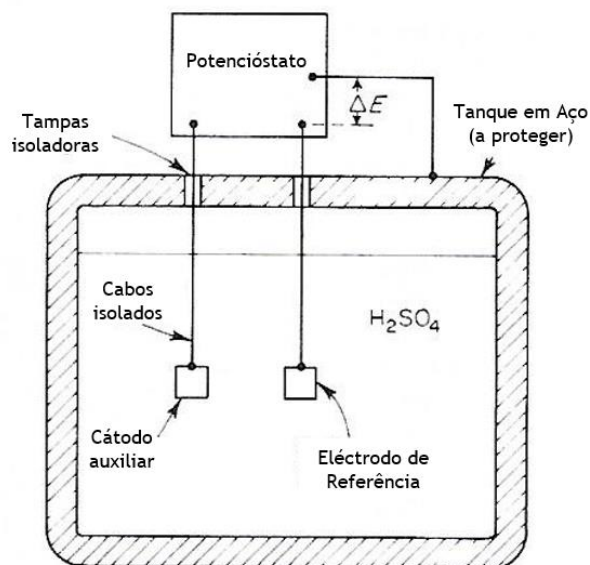


Figura 22: Protecção anódica aplicada a um tanque de aço contendo ácido sulfúrico (Adaptado de [30]).

Para a utilização deste método é necessário conhecer as gamas de potencial em que o material tem comportamento passivo, de forma a aplicar-se o potencial necessário que manterá os valores de corrente baixos. Este método de protecção só pode ser utilizado em condições especiais e muito controladas, pois a basta a variação do pH do meio ocorrer que o material saí de imediato a zona de passivação entrando numa zona em que a corrente é muito elevada.

2.4.3.5. Efeito da razão de área de superfície entre o Cátodo e o Ânodo

Para a manutenção de um potencial de protecção adequado ao equipamento é necessário fornecer ao eléctrodo a proteger um certo valor de densidade de corrente, e acordo com o electrólito e com a velocidade do escoamento e turbulência. Conhecendo-se a densidade de corrente fornecida pelo ânodo, é possível calcular a área necessária para o ânodo de sacrifício proteger o equipamento [36].

O potencial do sistema é controlado pela relação da área exposta do cátodo e do ânodo. Quanto maior for a área do cátodo comparada com a área do ânodo, maior será a redução de oxigénio e, por sua vez, maior a corrente galvânica.

Do ponto de vista prático da resistência de um par de metais ligados, o rácio de áreas menos favorável é ter um cátodo com uma área elevada comparada com a área do ânodo.

Este efeito é largamente relatado e exemplificado em diversas fontes, com exemplos de casos práticos. Estas experiências consistem em ligar dois metais com diferentes posições na série galvânica e variar a área exposta entre ambos, em dois casos distintos (Figura 23 e Figura 24).



Figura 23: Ensaio de variação de área entre o cátodo e o ânodo (Placa em Cobre e Rebites em Aço) [36].

Na Figura 23 é possível verificar que após o tempo de exposição, os rebites de Aço corroeram-se por completo.

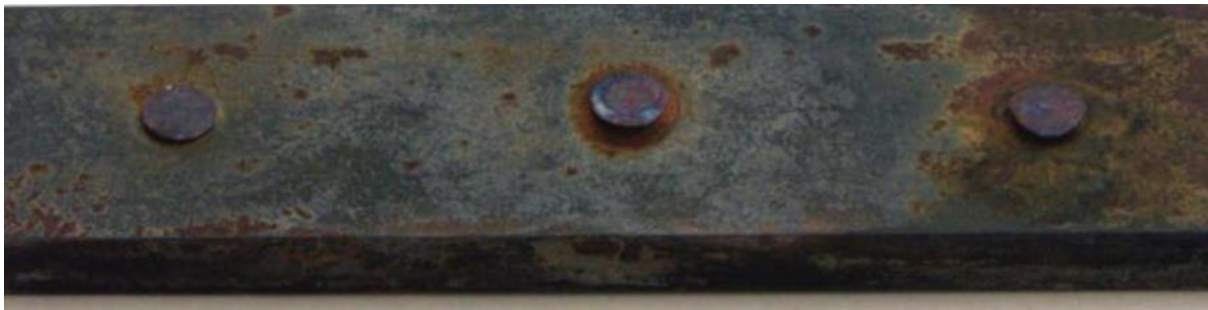


Figura 24: Ensaio de variação de área entre o cátodo e o ânodo (Placa em Aço e Rebites em Cobre) [36].

Na Figura 24 é possível verificar que após o tempo de exposição, os rebites em Cobre encontram-se pouco corroídos e a placa de Aço com sinais de corrosão nas zonas mais próximas à união entre os dois metais. Conclui-se que o caso mais extremo, que pode até comprometer a resistência estrutural, é então o de existir uma pequena área anódica comparada com a área exposta do cátodo. Este erro de selecção dos materiais é recorrentemente cometido em projectos de engenharia nas mais diversas áreas, nomeadamente em uniões de peças que utilizam parafusos ou rebites que são fabricados em materiais diferentes dos componentes a unir [36].

2.4.4. Ensaios de Corrosão

A maior parte dos ensaios de corrosão realizados têm o objectivo prático de testar soluções para ambientes industriais ou de construção. Estes ensaios, na maior parte das vezes, não são realizados em laboratórios com condições completamente controladas, pois pretende-se simular as condições do local em que os materiais se encontrarão. No entanto, os ensaios devem ser rigorosamente realizados de forma a poderem ser replicados e os resultados serem fiáveis. Para que os resultados sejam precisos, ou apenas qualitativamente comparáveis, deve existir uma correcta documentação de todos os procedimentos efectuados.

2.4.4.1. Classificação dos ensaios de Corrosão

Os ensaios de corrosão estão divididos em quatro diferentes grupos [30]:

- Ensaio Laboratoriais;
- Ensaio em sistemas de produção piloto ou experimentais;
- Ensaio no local de utilização;
- Ensaio de campo.

A diferença entre os dois últimos é que no terceiro caso os ensaios são realizados numa situação particular de serviço ou instalação, enquanto no último caso pretende-se obter uma solução mais genérica.

Os ensaios em laboratório são caracterizados por serem realizados com um número reduzido de amostras e numa dimensão reduzida. As condições dos ensaios tentam aproximar as reais condições a que as peças serão sujeitas. Por norma, os ensaios são realizados *a priori* de um ensaio *in loco*, já que possibilitam uma selecção preliminar dos materiais.

A realização dos ensaios em sistemas de produção piloto, ou experimentais, são normalmente os mais desejados. Estes, para além de permitirem a simulação de todas as variáveis do processo, permitem muitas vezes, também, a experimentação de diferentes materiais para comparação de resultados.

2.4.4.2. Necessidade de realização de Ensaio de Corrosão

Os ensaios de corrosão são normalmente realizados com um propósito prático, embora em ambiente académico se realizem ensaios menos rotineiros de modo a compreender os mecanismos das reacções de corrosão, entre outros trabalhos de investigação e desenvolvimento. Estes ensaios envolvem técnicas especializadas e medições precisas.

A vertente mais prática dos ensaios pode ser dividida em três grupos, a saber:

- Avaliação e selecção de materiais para um determinado ambiente ou aplicação. Normalmente ocorre aquando de um novo projecto ou modificações de componentes, tendo em vista uma redução de custos do produto, melhorar a resistência e segurança.
- Avaliação da resistência à corrosão de novos metais ou ligas, de forma a determinar em que ambientes podem ser utilizados. Estes ensaios são normalmente realizados pelos fabricantes e vendedores dos materiais.
- Controlo da resistência à corrosão ou controlo da corrosividade do meio. Estes ensaios fazem normalmente parte das operações de rotina de inspecção. Por vezes as condições do meio alteram-se, tal como a temperatura e concentração das soluções envolventes. Ambas as variáveis são críticas no desenrolar dos processos de corrosão, pelo que, através das acções de controlo, os danos da corrosão podem ser atenuados, se uma solução de mitigação for utilizada.

3. Métodos

Ao longo deste capítulo serão abordados os métodos utilizados tanto na análise RAM, como também da análise realizada ao processo de corrosão nos motores Fora de Bordo.

3.1. Metodologia Reliability, Availability and Maintainability (RAM)

Com vista a obter um produto final coeso e funcional, devem ser aplicadas estratégias de manutenção. O processo RAM vem desta forma tornar o processo de aplicação das estratégias de manutenção mais rigoroso. A implementação do processo RAM deve ser realizada desde a fase de projecto. Desta forma, acções correctivas no projecto podem ser feitas de maneira a permitir cumprir os requisitos estipulados e permitir as alterações necessárias no desenvolvimento desde as primeiras fases. O funcionamento de um equipamento mecânico, por mais robusto que seja o sistema, irá requerer algum tipo de inspecção ou reparação ao longo do tempo de vida do equipamento. Desta forma há que permitir que o sistema seja inspeccionado e reparado se necessário.

A análise RAM é uma associação e integração de diferentes processos com o objectivo final de garantir o correcto funcionamento de um equipamento a vários níveis. Para um dado equipamento, são estabelecidas na fase de projecto as especificações a nível de desempenho e funcionalidade, mas também nas outras componentes ligadas à manutenção, a saber, Fiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade.

A análise RAM está dividida em cinco processos descritas a baixo:

3.1.1.1. Análise Funcional do sistema

Primeiramente é necessário conhecer o funcionamento dos vários sistemas e subsistemas, de forma a que seja possível criar um esquema de fácil interpretação dos vários níveis do sistema. Os requisitos para as diversas funções são identificados, assim como são identificados os componentes envolvidos nessas funções críticas.

Para isso, subdivide-se o equipamento completo em vários subsistemas, identificando claramente qual a sua missão e funções, até chegar aos componentes individuais desses subsistemas.

3.1.1.2. Diagrama de blocos da Fiabilidade

A representação esquemática da estrutura lógica da fiabilidade é o passo seguinte à esquematização funcional do sistema. Nesta fase os subsistemas ou componentes são representados por blocos que

se interligam entre si, respeitando a sequência de funcionamento do sistema original. Nesta esquematização, os subsistemas são vistos como blocos que funcionam como interruptores. Sendo que apenas deixam propagar a ordem se estiverem a funcionar, fechando o circuito, ou deixando o circuito em aberto caso se encontrem inoperacionais. Esta etapa é fundamental para o cálculo da Fiabilidade e Disponibilidade do sistema [37].

Em qualquer sistema a interligação, entre subsistemas ou componentes, pode ser feita em série ou em paralelo. Num sistema em série (Figura 25), com a paragem de um subsistema ou componente, teremos a paragem dos subsistemas ou componentes que se seguem. Por outro lado, um sistema em paralelo (Figura 26), permite que os subsistemas ou componentes ligados funcionem mesmo que exista a paragem de um deles. Uma das formas de garantir o funcionamento do equipamento em funções críticas é introduzir redundância ao sistema, ou seja, ligar dois subsistemas ou componentes em paralelo permitindo desta forma que o sistema continua em funcionamento em caso de falha de um dos componentes. A equação (3.1) refere-se ao cálculo da fiabilidade para um sistema com i componentes em série, para uma taxa de avaria associada. [37] [38]



Figura 25: Esquema Sistema em Série

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) = \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i t} \quad (3.1)$$

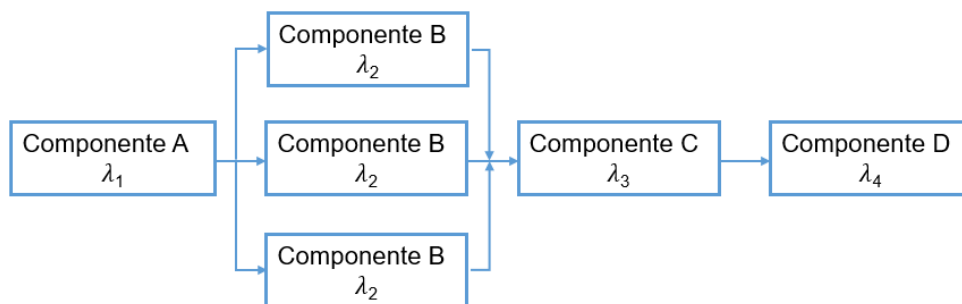


Figura 26: Esquema Sistema em série com três componentes (componente B) em paralelo

$$R_B(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (3.2)$$

A equação (3.2) refere-se ao cálculo da fiabilidade para um sistema com i componentes em paralelo, para uma taxa de avaria associada.

3.1.1.3. Métodos de análise dos Modos de Falha

Para a implementação rigorosa e metodológica dos princípios RAM há que recorrer a métodos e técnicas de análise, de forma a possibilitar a quantificação e qualificação dos diversos modos de falha. No presente estudo, foi analisado o seguinte método de análise: *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* (FMECA). O método escolhido para a análise teve por base o tipo de resultados apresentados e variáveis analisadas que se enquadram com os objectivos do presente estudo.

3.1.1.4. Acções de Mitigação do Risco

Definidos os modos de falha críticos através do método de análise utilizado, segue-se o trabalho de mitigar o risco que advém dessa falha. Para isso, há que fazer alterações que permitam reduzir a gravidade da falha. Essas alterações podem incidir em diferentes áreas e fases do projecto, como por exemplo definir procedimentos e condições especiais de operação do equipamento, procedimentos de manutenção, procedimentos de verificação e projecto do equipamento.

3.1.1.5. Requisitos RAM

Os objectivos de fiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade devem ser definidos formalmente nos requisitos, para os vários sistemas e subsistemas. Por norma, pretende-se que um sistema tenha a maior disponibilidade possível. Para cumprir esse objectivo, não é apenas necessário aumentar a fiabilidade do sistema, optimizando o sistema para esse fim, mas também fazer com que o sistema possua um tempo médio entre falhas (MTBF) elevado e um tempo médio de reparação (MTTR) baixo.

Este é um passo iterativo, pois, para os requisitos estabelecidos, os parâmetros reais após testes podem ficar aquém do estabelecido. Quando os requisitos não são cumpridos, são propostas alterações no projecto, especificados procedimentos de operação, formação específica do operador/utilizador e acções de manutenção programadas. Implementando um esquema de manutenção preventiva, com substituição prévia, fará reduzir o risco e tempos de paragens forçadas por avaria. Por fim, ao ser estabelecida a troca periódica de componentes críticos simplifica o processo de gestão de componentes em stock e permite também optimizar os valores e espaço investidos nessa tarefa.

De forma a cumprir com os requisitos RAM estabelecidos, é necessário recorrer a um método de análise das falhas. A metodologia FMECA permite realizar uma análise estruturada das falhas, que será desenvolvido no capítulo seguinte.

3.2. Metodologia e Etapas da Análise FMECA

A aplicação da metodologia de análise FMECA, requer um conhecimento aprofundado do funcionamento do sistema. A equipa de investigação deve ser composta por vários profissionais especialistas nos sistemas a analisar e por um especialista experiente na aplicação da análise FMECA [39].

De modo a que a análise seja rigorosamente realizada, esta deve seguir alguns passos chave:

- 1.º- *Brainstorming* para a avaliação dos potenciais modos de falha;
- 2.º- Listagem os Potenciais Efeitos dos diferentes Modos de Falha;
- 3.º- Atribuição numa dada escala o grau de Severidade (S) para cada Modo de Falha;
- 4.º- Atribuição numa dada escala o grau de Frequência de Ocorrência (F) para cada Modo de Falha;
- 5.º- Atribuição numa dada escala o grau de Detectabilidade (D) para cada Modo de Falha;
- 6.º- Atribuição o Critério de Risco (Risk Priority Number, RPN) para cada Modo de Falha.

$$RPN = F \times S \times D \quad (3.3)$$

Após a determinação dos modos de falha mais críticos, que correspondem aos modos de falha com os valores de RPN mais elevados, deverão ser esses os primeiros a ser analisados com maior detalhe. Desta forma, podem ser aplicadas acções que permitam reduzir o risco e, idealmente, diminuir os valores de RPN para todos os modos de falha.

A seguinte informação deve ser apresentada para cada componente, de forma a tornar a análise completa:

- Função Crítica
- Componente
- Detecção
- Modo de Falha
- Possível causa
- Possível consequência
- Acção Correctiva

A aplicação do método FMECA implica classificar a falha segundo vários índices, nomeadamente a probabilidade de Ocorrência, Severidade da falha e pela dificuldade de detecção da falha aquando de uma manutenção de rotina. De acordo com o tipo de equipamento, os índices de classificação podem prever outros factores mais específicos, como por exemplo o risco causado por essa falha para a segurança de passageiros. Dado o grande espectro de actividades em que o FMECA é utilizado, os intervalos de valores têm que ser ajustados para as diferentes áreas em que o método está inserido.

Para classificar as falhas existem diversas propostas por parte de diferentes autores. Para Stamatis (Tabela 3: Probabilidade de Ocorrência de falha segundo Stamatis Tabela 3), os valores para os índices estão associados a percentagens de frequências de ocorrência bastante reduzidas. Por outro lado, Hassankiadeh (Tabela 4) considera valores de percentagens de frequência relativa bem acima dos valores considerados por Stamatis.

Tabela 3: Probabilidade de Ocorrência de falha segundo Stamatis [26]

Índice	Descrição	Intervalo (%)
1	Não é provável que a falha ocorra (1 em 1.000.000)	0% - 0,001%
2	Muito pouco provável que a falha ocorra (1 em 20.000)	00,0001% - 0,005%
3	Pouco provável que a falha ocorra (1 em 4.000)	0,005% - 0,025%
4 - 6	Probabilidade moderada de ocorrência de falha (1 em 1.000 até 1 em 80)	0,1% - 1,25%
7 - 8	Probabilidade alta de ocorrência de falha (1 em 40 até 1 em 20)	2,5% - 5%
9 - 10	Probabilidade extrema de ocorrência de falha (1 em 10)	10%<

Tabela 4: Probabilidade de ocorrência de falha segundo Hassankiadeh [40]

Índice	Descrição	Intervalo (%)
1	Não ocorre	DFR = 0
2	Baixa (Poucas falhas)	0<DFR<5
3	Média (Falhas ocasionais)	5<DFR<10
4	Alta (Falhas repetidas)	10<DFR<20
5	Muito alta	20<DFR

Outros intervalos de critérios de classificação encontram-se disponíveis em diversas fontes, no entanto, na maior parte dos artigos científicos, onde é aplicado o RPN na análise FMECA, os índices variam de um a dez com a correspondência apresentada nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 5: Índices de Frequência de Ocorrência

Índice	Intervalo (%)
1	0<Freq<10
2	10<Freq<20
3	20<Freq<30
4	30<Freq<40
5	40<Freq<50
6	50<Freq<60
7	60<Freq<70
8	70<Freq<80
9	80<Freq<90
10	90<Freq<100

Tabela 6: Índices de Severidade da Falha

Índice	Descrição
1	Nenhuma
2	Muito Insignificante
3	Insignificante
4	Muito Baixa
5	Baixa
6	Moderada
7	Alta
8	Muito Alta
9	Muito Perigosa com Aviso
10	Muito Perigosa sem Aviso

Tabela 7: Índice de Detectabilidade

Índice	Descrição
1	Com Certeza
2	Muito Alta
3	Alta
4	Moderadamente Alta
5	Moderada
6	Baixa
7	Muito Baixa
8	Remota
9	Muito Remota
10	Impossível

3.3. Cálculo da Taxa de Falha

A taxa de falha representa a frequência com que um sistema ou componente falha. Esta variável expressa o número de falhas por unidade de tempo e é simbolizada por a letra grega λ .

A taxa de falha normalmente varia com o tempo, estando dependente do estado de vida do sistema ou componente em análise. No entanto, na gestão da manutenção de componentes electrónicos e mecânicos considera-se que a taxa de falha é constante, podendo desta forma ser relacionada com o tempo médio entre falhas (MTBF) eq.(3.7).

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (3.7)$$

De forma a obter dados mais precisos da taxa de falha, é necessário realizar ensaios com o sistema ou componente em teste. No entanto, estes ensaios são morosos e dispendiosos, dada a necessidade

de testar os equipamentos até à falha. Desta forma, são utilizados dados obtidos das falhas que ocorrem em serviço. O algoritmo seguinte é válido para ambas as situações.

Na fase de projecto são definidos os requisitos de Disponibilidade e de Manutenibilidade. O projectista define qual é a missão daquele sistema ou componente. Após o término da missão são contabilizados o número de sistemas ou componentes que falharam. A equação (3.8) permite chegar ao valor da taxa de falha [41].

$$\lambda = \frac{\Delta N_f}{T_{serviço\ acumulado}} \quad (3.8)$$

Sendo ΔN_f o número de falhas aquando do término da missão estabelecida e $T_{serviço\ acumulado}$ correspondente ao número total de horas acumuladas em serviço de todos os sistemas ou componentes.

Depois de descritos os métodos utilizados na análise RAM, importa passar ao capítulo da corrosão, onde se dará conta dos procedimentos e a metodologia para o cálculo da taxa de corrosão/penetração.

3.4. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração

O cálculo da taxa de corrosão pode ser efectuado de duas maneiras distintas, que são apresentados nos pontos 3.4.1 e 3.4.2.

3.4.1. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração através da Lei de Faraday

A Corrosão em meios aquosos é determinada principalmente por reacções electroquímicas. Estas reacções produzem ou consomem electrões, daí que o fluxo de electrões é proporcional à taxa de corrosão. O fluxo de electrões I , é medido em ampere, sendo que um ampere corresponde à carga de um coulomb por segundo. A carga de um coulomb corresponde ao fluxo de $6,2 \times 10^{18}$ electrões por segundo. A proporção entre a massa em reacção m e a intensidade de corrente I numa reacção electroquímica é dada pela Lei de Faraday (eq.3.9) [42]. A densidade de corrente é proporcional à taxa de corrosão, dado que para um certo valor de corrente e para uma área de superfície menor, fará com que a taxa de corrosão seja superior.

$$m = \frac{Ita}{nF} \quad (3.9)$$

Na equação F é a constante de Faraday (96 500 000 coulomb/mol de electrões), n o número de mol de electrões necessários para converter uma mol da espécie, a a massa atómica e t o tempo em segundos.

$$r = \frac{m}{tA} = \frac{ia}{nF} \quad (3.10)$$

Na equação, o valor i representa a densidade de corrente, que equivale a dividir a intensidade de corrente pela área exposta. Ao dividir-se a massa em reacção pelo tempo e pela área de superfície obtemos a taxa de corrosão r . A taxa de corrosão, vem dada unidades de massa por unidade de área e de tempo ($m/A \cdot t$).

De forma a obter-se a taxa de penetração por unidade de tempo, é necessário dividir a equação (3.9) pela densidade do metal ou da liga ρ .

$$r = \frac{ia}{n\rho} \quad (3.11)$$

Para o caso de ligas metálicas a correspondência entre a taxa de penetração e a densidade de corrente requer a determinação do peso equivalente, a/n . Para isso, é recomendado utilizar um método que consiste em somar as fracções entre os equivalentes para os vários elementos da liga.

$$N_{eq} = \sum \left(\frac{f_i}{\frac{a_i}{n_i}} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right) \quad (3.12)$$

Onde f_i corresponde à fracção mássica do elemento na liga, n_i o número de electrões em reacção e a_i a massa atómica. O peso equivalente corresponde ao inverso de N_{eq} [42].

$$P_{eq} = \frac{1}{N_{eq}} \quad (3.13)$$

3.4.2. Cálculo da Taxa de Corrosão/ Penetração através da perda de massa

A taxa de corrosão do material pode ser apresentada em diversas unidades, relacionando a perda de espessura de material com uma unidade de tempo. Para isso é necessário saber a variação de massa da amostra m , o tempo de exposição da amostra aos elementos t , a densidade do material ρ e a área de superfície exposta A .

$$\text{taxa de corrosão ou penetração} = \frac{m}{\rho \Delta t} \quad (3.14)$$

Na equação (3.13) devem ser utilizadas unidades dos Sistema Internacional de forma a existir coerência, o valor da massa m é dada em kg , o valor da densidade ρ é dado em kg/m^3 , a área A é dada em m^2 e o tempo t é dado em *horas*. O resultado obtido da refere-se à perda de espessura por unidade de tempo.

4. Caso de Estudo

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo do presente trabalho, que consiste no estudo dos modos de falha dos motores fora de bordo, assim como a descrição dos ensaios de corrosão realizados a um mesmo modelo de motor da gama da Yamaha Marine.

4.1. Identificação e descrição dos potenciais modos de falha

Seguindo a metodologia FMECA apresentada no ponto 3.2, apresentam-se os seis passos de forma a assegurar a correcta aplicação do método de análise.

1.º Passo:

- O levantamento dos modos de falha foi realizado mediante a realização de questionários aos concessionários da rede Yamaha que prestam serviços de reparação dos motores da marca. Pelo facto de ser nas oficinas da marca que surgem os equipamentos com avarias, decidiu-se que a recolha de informação deveria ser realizada junto dos mesmos.

Existem diversas formas de classificar os modos de falha. Hassankiadeh agrupa os modos de falha por tipo de causa dos mesmos [40], enquanto que Jovanovic apresenta os modos de falha por componente [43]. No caso de estudo decidiu-se apresentar os modos de falha por componente.

2.º Passo:

- Na Tabela 8 são apresentados os principais modos de falha que ocorrem nos motores fora de bordo.

Tabela 8: Listagem dos potenciais modos de falha

Função Crítica	Componente	Modo de Falha
Garantir a transmissão de potência à Hélice	Engrenagens	• Sem contacto entre engrenagens
Garantir o fornecimento de combustível aos injectores	Bomba Gasolina	• Pressão Baixa
		• Pressão Elevada
		• Falha Eléctrica
		• Falha Mecânica
	Injectores	Fornecimento de combustível ineficaz
Separador de Vapor	• Impossibilidade de manter a pressão recomendada	

Função Crítica	Componente	Modo de Falha
		<ul style="list-style-type: none"> • Arrefecimento do combustível insuficiente
Garantir e regular a temperatura de funcionamento do motor	Termostato	<ul style="list-style-type: none"> • Fechado/Bloqueado • Aberto ou com fuga
	Bomba de Água	<ul style="list-style-type: none"> • Sem circulação de água
Garantir a reposição da carga da bateria	Alternador/Rectificador/Regulador	<ul style="list-style-type: none"> • Estator danificado • Rotor danificado • Placa Rectificadora danificada • Regulador de tensão danificado • Cabos ou contactos eléctricos danificados
Garantir a passagem das acções de comando ao motor	Cabos de Comando Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Sem ligação
	Cabos de comando Eléctricos	
Garantir o controlo da direcção da embarcação	Direcção Hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga no circuito de óleo
	Direcção mecânica	<ul style="list-style-type: none"> • Sem ligação
Garantir o início de marcha do motor	Motor de Arranque	<ul style="list-style-type: none"> • Rotação ineficaz • Ausência de Rotação
Garantir a regulação da atitude da embarcação em deslocamento	Trim	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de Óleo
		<ul style="list-style-type: none"> • Problema Eléctrico
Garantir a função dos Pistões	Segmentos	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo Excessivo de Óleo • Baixa Compressão em teste de compressão

Estes potenciais modos de falha constituem o grupo dos sujeitos à quantificação da probabilidade de ocorrência, Severidade e Detectabilidade. A quantificação será utilizada de forma a dar prioridade à análise de certos modos de falha, para posterior atribuição de acções de mitigação que irão reduzir o risco desses modos de falha.

3.º, 4.º e 5.º Passos:

- Estes passos correspondem à classificação dos modos de falhas nas três categorias seleccionadas no estudo, a Frequência de Ocorrência (Tabela 9), a Severidade (Tabela 10) e a Detectabilidade (Tabela 11). Foi escolhido utilizar uma escala de um a dez para cada categoria, sendo que um corresponde a um risco baixo enquanto o 10 corresponde a um risco elevado. Para cada valor da escala foram criadas legendas, de forma a auxiliar o processo de selecção do índice para cada modo de falha.

Tabela 9: Probabilidade de ocorrência de falhas

Frequência das ocorrências									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
≤ 10% (Raro)	≤ 20%	≤ 30%	≤ 40%	≤ 50%	≤ 60%	≤ 70%	≤ 80%	≤ 90%	= 100% (Mto. freq.)

Tabela 10: Efeitos potenciais causados pela falha nos sistemas adjacentes

Severidade da Falha									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nenhuma	Muito Insignificante	Insignificante	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta	Muito Perigosa com Aviso	Muito perigosa sem Aviso

Tabela 11: Probabilidade de a falha ser detectada antes que ocorra

Detectabilidade									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Com certeza	Muito Alta	Alta	Moderadamente Alta	Moderada	Baixa	Muito Baixa	Remota	Muito Remota	Impossível

A escolha do índice para cada modo de falha foi feita conjuntamente com os mecânicos das oficinas da rede Yamaha e com o coordenador de serviço da Yamaha Portugal.

6.º Passo:

- Neste passo é calculado o valor de RPN (equação 3.3) para cada modo de falha através da multiplicação dos valores dos índices seleccionados de Frequência de Ocorrência, Severidade e de Detectabilidade. Na análise realizada, considerou-se três níveis de risco de inoperacionalidade baseados nos valores de RPN, aos quais se associaram as cores, verde, amarelo e vermelho.

Tabela 12: Risco Inoperacionalidade/ RPN

Risco de inoperacionalidade	Valor de RPN
Baixo	RPN < 75
Médio	75 < RPN < 150
Alto	RPN > 150

Na Tabela 13 são apresentados os valores de RPN para os diferentes modos de falha, após a classificação dos diferentes índices por parte da equipa.

Tabela 13: Tabela modos de falha vs RPN

Componente	Frequência das Ocorrências	Severidade da Falha	Detectabilidade	RPN
	1 (Raro) a 10 (Muito Frequente)	1 (nenhuma) a 10 (Muito Perigoso sem aviso)	1 (detecção com certeza) a 10 (detecção completamente impossível)	
Engrenagens	1	9	9	81
Bomba Gasolina	5	7	6	210
Injectores	3	6	8	144
Separador de Vapor	2	8	7	112
Termostato	4	7	6	168
Bomba de Água	4	7	8	224
Alternador/ Rectificador/ Regulador	2	5	4	40
Cabos de Comando	2	4	5	40
Direcção Hidráulica	1	7	4	28
Motor de Arranque	2	8	5	80
Trim	4	6	2	48
Segmentos	2	6	8	96

4.2. Ensaios de Corrosão

Pela frequência que os motores apresentam sinais de corrosão e dada a importância que os seus efeitos têm para a imagem e percepção da qualidade dos equipamentos por parte dos clientes, decidiu-se que deveria ser aprofundado o estudo do processo de corrosão nos motores fora de bordo.

Neste estudo foram realizados três tipos de ensaios de corrosão, a saber:

- Medição da Intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de protecção para diferentes regimes de rotação do motor;
- Quantificação da taxa de corrosão/ penetração do ânodo;
- Medição do Potencial do motor para razões diferentes razões de área de exposição do motor e do ânodo.

Todos os ensaios tiveram algumas condições em comum, que serão apresentadas no ponto (4.2.1) que tentaram replicar as condições mais comuns de utilização dos motores fora de bordo. Primeiramente são descritas as condições comuns a todos os ensaios.

4.2.1. Condições em comum dos três tipos de ensaio

Composição e concentração dos sais misturados no tanque de testes

Embora a água do mar possua vários iões dissolvidos, que estão apresentados na Tabela 14, decidiu-se apenas dissolver cloreto de sódio, já que este é o mais abundante e o que mais influencia no processo de corrosão do aço e do alumínio. A salinidade média da água do mar é 3,5%, sendo que os iões predominantes são o cloreto e o sódio. Estes representam cerca de 85% dos sais existentes na água do mar.

Tabela 14: Principais Iões dissolvidos na água do mar

Íon	Símbolo	Concentração (g/kg)	Proporção (%)
Cloreto	Cl ⁻	19,3529	55,056
Sódio	Na ⁺	10,7838	30,678
Sulfato	SO ₄ ²⁻	2,7124	7,716
Magnésio	Mg ²⁺	1,2837	3,652
Cálcio	Ca ²⁺	0,4121	1,172
Potássio	K ⁺	0,3991	1,135
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	0,1070	0,304
Brometo	Br ⁻	0,0672	0,191
Carbonato	CO ₃ ²⁻	0,0161	0,046
Estrôncio	Sr ²⁺	0,0079	0,022
Borato	B(OH) ₄ ⁻	0,0079	0,022
Fluoreto	F ⁻	0,0013	0,004
Total		35,1514	100,000

Uma aproximação válida é assumir que a totalidade dos iões são o cloreto e o sódio. Pelo que para 965 kg de água, foram adicionados 35 kg de sal. Adicionou-se sal para piscina da marca Axton com 99,4% de cloreto de sódio, que contém um aditivo anti-aglomerante (hexacianoferrato (III) de sódio).

• Componentes em estudo

Utilizou-se um motor fora de bordo da Yamaha de 115 cavalos de potência. O fabricante tem disponíveis hélices de Alumínio e de Aço Inoxidável, para o modelo de motor em questão.

Seleccionou-se uma hélice de aço inoxidável, de forma a potenciar os efeitos da corrosão galvânica. O ânodo de sacrifício utilizado corresponde ao chamado estabilizador de direcção, que se encontra ligado à unidade inferior do motor, junto à hélice. Os componentes encontram-se identificados na Figura 27.



Figura 27: Componentes utilizados nos ensaios de corrosão.

Preparação da superfície do ânodo

As amostras foram limpas antes e após aos ensaios com um pano não abrasivo e desengorduradas com acetona.

4.2.2. Medição da Intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de protecção para diferentes regimes de rotação do motor

Neste ensaio realizou-se a medição da intensidade de corrente que circula entre o ânodo de sacrifício e a superfície da unidade inferior do motor, de forma a estudar o seu comportamento.

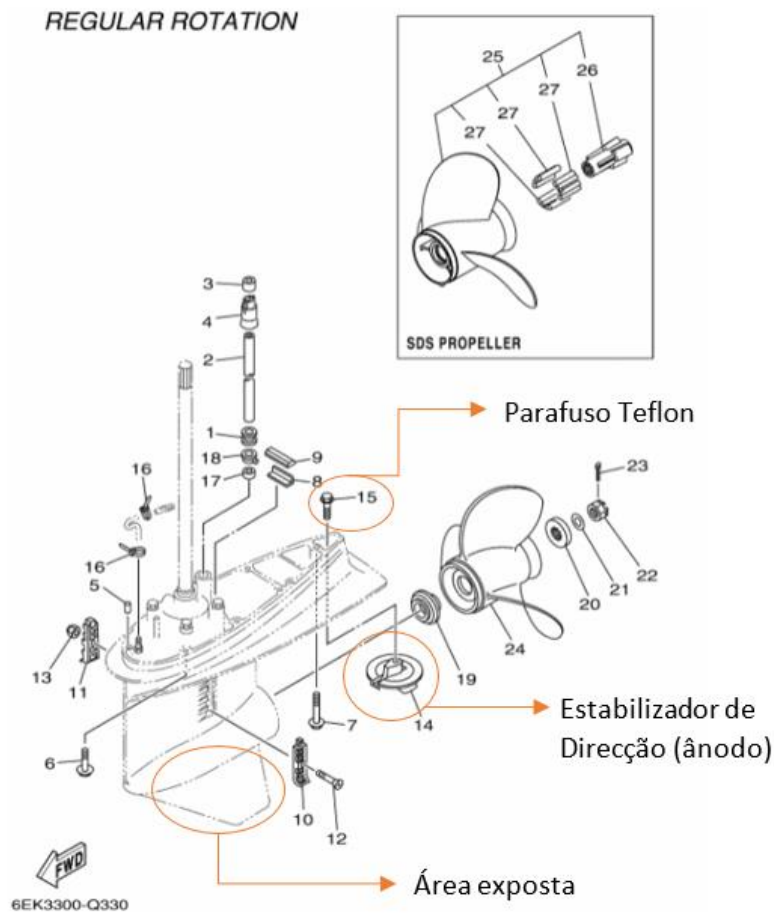


Figura 28: Esquema unidade inferior do motor

Não existindo uma falha no revestimento (pintura), retirou-se uma parte desse revestimento de forma a funcionar como cátodo e acelerar o processo de corrosão. Essa falha no revestimento foi realizada na parte inferior do motor de forma a simular os danos recorrentemente observados na pintura (Figura 28), devido ao facto de esta parte se encontrar mais exposta aos elementos.

A intensidade da corrente que circula entre o ânodo e o cátodo deverá variar para diferentes regimes de rotação do motor. Assim, foram escolhidos seis regimes de rotação, dentro da gama de rotações permitida pelo motor. Apesar de o intervalo de rotação ser entre o ralenti e as 5800 rpm, o ensaio teve que ser limitado às 2500 rpm pois a rotações superiores a água do tanque era projectada para o exterior, inviabilizando o ensaio.

1. 0 rpm
2. Ralenti \approx 750 rpm
3. 900 rpm
4. 1200 rpm
5. 1700 rpm
6. 2000 rpm

7. 2500 rpm

Renovou-se a água após cada ensaio, de forma a manter as mesmas condições para os vários ensaios e assim remover os vestígios de óleo e combustível no final de cada ensaio.

Sabendo à partida que os valores de corrente no processo de corrosão demoram algum tempo a entrar em regime estacionário, decidiu-se que só se realizaria um ensaio por dia.

Esquema de montagem do ensaio

A Figura 29 representa o esquema de montagem realizado neste ensaio.

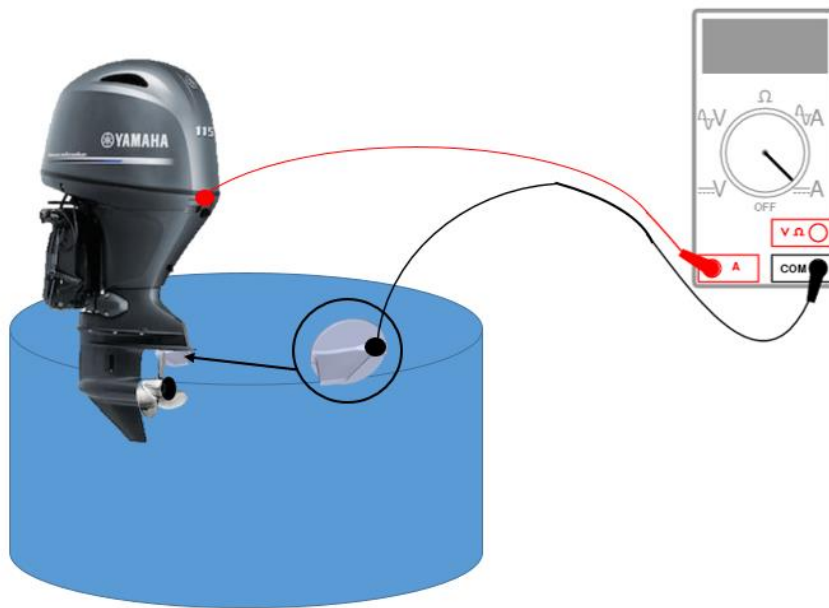


Figura 29: Esquema de montagem no ensaio da medição da intensidade de corrente

Ligação eléctrica entre o cátodo e ânodo com o amperímetro

De forma a medir a intensidade de corrente entre o cátodo e o ânodo, através do amperímetro (SANWA CD-7200), teve-se o cuidado em garantir que toda a corrente passava pelo amperímetro. Para isso, isolou-se o ânodo do motor em todos os pontos de contacto originais, permitindo que houvesse apenas a passagem de corrente pela ligação ao amperímetro. Na Figura 30 é possível visualizar o revestimento de epóxi aplicado no ânodo, de forma a isolar electricamente as zonas de contacto do mesmo com o motor e isolar da água a ligação do cabo de cobre com o ânodo.



Figura 30: Estabilizador de direcção após revestimento de epóxi.

Dado que a agitação da água influencia o processo de corrosão, o ânodo deve ser colocado na posição original. Para isso, maquinou-se um parafuso M10 com cabeça sextavada em *Teflon* (Figura 31) de forma a fixar o ânodo ao motor em vez do parafuso de origem em aço, permitindo assim o isolamento eléctrico entre ambos os componentes naquele ponto de contacto.

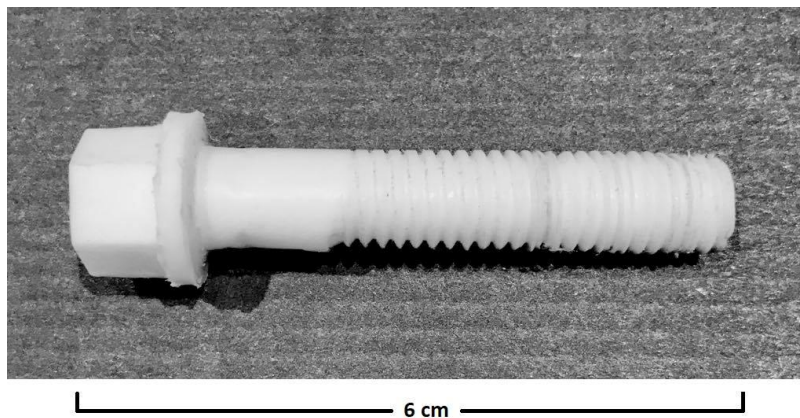


Figura 31: Parafuso maquinado em Teflon

De forma a permitir a passagem de corrente entre o ânodo e o cabo foi realizado um furo de três milímetros com um engenho de furar, visível na Figura 32.



Figura 32: Furo realizado no ânodo

Na Figura 33 é possível verificar a união realizada entre o ânodo e o cabo de ligação ao amperímetro. A ligação foi realizada através de soldagem. Posteriormente, a ligação foi revestida com epóxi de forma a que o cobre do fio soldado não interferisse na reacção.



Figura 33: Ligação e Protecção da ligação entre o ânodo e o cabo de ligação ao amperímetro

4.2.3. Quantificação da taxa de corrosão/ penetração do ânodo

Neste ensaio foi quantificada a perda de material do ânodo do motor. Para isso, após um certo intervalo de tempo em que o motor se manteve no tanque, foi medida a massa da amostra de forma a quantificar a perda de massa do ânodo para a área exposta do mesmo.

Duração e condicionantes do ensaio

De forma a simular os períodos extensos de paragem das embarcações nas marinas, e também de forma a obter-se um valor de perda de massa mensurável, o ensaio teve a duração de 31 dias.

O motor esteve desligado durante toda a duração do teste e apenas com a unidade inferior dentro de água. Apenas o ânodo (estabilizador de direcção) permaneceu mergulhado na água e na sua posição original.

Na Figura 34 são mostradas as condições a que o motor foi sujeito durante os ensaios de determinação da taxa de corrosão/penetração ao longo de toda a duração do ensaio.



Figura 34: Montagem do motor durante o ensaio de determinação da taxa de corrosão/penetração do ânodo

A área de superfície é um dos parâmetros importantes a saber, de forma a calcular taxa de corrosão/penetração. A área da superfície do ânodo foi estimada com recurso a um scanner electrónico tridimensional com o posterior recurso a um software de modelação tridimensional.

Após o intervalo de tempo estipulado, a amostra foi pesada. A área da superfície final foi estimada como inicialmente, de forma a calcular a variação de área entre a superfície inicial e a superfície final e a

massa medida com uma balança com precisão à centésima de grama (Laboratório de Electroquímica IST).

- Área de superfície inicial do ânodo: 21 468,48 mm^2
- Área de superfície final do ânodo: 21 501,42 mm^2
- Massa inicial do ânodo: 0,415 46 kg
- Massa final do ânodo: 0,404 73 kg

No cálculo da taxa de corrosão as unidades com mais significado prático são dadas em nanómetros de penetração por hora de funcionamento do motor nm/hr , pois todos os parâmetros de manutenção dos motores fora de bordo são dados em horas de funcionamento do motor.

Desta forma, à equação (3.13) são adicionadas a devida conversão que se apresentam na equação (4.1).

$$taxa\ de\ corros\tilde{a}\ em\ \frac{nm}{hr} = 10^9 \cdot \frac{m}{\rho At} \quad (4.1)$$

4.2.4. Medição do Potencial do motor para diferentes razões de área de exposição do motor e do ânodo

Neste ensaio variou-se a área de exposição do ânodo, mantendo a área exposta do motor constante (1 476 260 mm^2), de forma a verificar se o método de protecção catódica estava a ser eficaz.

Para a manutenção da protecção catódica há que manter o conjunto do motor e do barco dentro de um certo intervalo de valores. Para esta confirmação, é necessário recorrer a um eléctrodo que funcione como referência.

No ensaio em questão foi utilizado um eléctrodo de referência de Calomelanos saturado (ECS).

Realizaram-se quatro medições de potencial eléctrico, com diferentes áreas de exposição do ânodo, apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Razão de área entre o ânodo de sacrifício e o motor.

Percentagem Área Exp Ânodo $\frac{A_{\text{ânodo}}}{A_{\text{cátodo}}} \times 100$	Área Exp Ânodo (mm^2)
0,00	0
0,23	3468,48
0,98	14468,48
1,15	16968,48
1,45	21468,48

O ânodo foi revestido com epóxi, de forma a deixar apenas uma certa percentagem da área total do ânodo exposta.

Para a medição dos potenciais foi utilizado um multímetro digital (SANWA CD-7200), regulado para o modo de voltímetro. O eléctrodo de referência foi ligado através de um cabo de ligação à porta COM e o cabo de ligação entre o motor ao multímetro foi ligado à porta V. O multímetro regulava a escala para mV de forma automática.



Figura 35: Esquema montagem da medição do potencial eléctrico recorrendo a um eléctrodo de referência de Calomelanos saturado (ECS)

Durante o ensaio, o eléctrodo de referência foi posicionado dentro de água a cerca de 20 centímetros do motor.

4.2.5. Determinação da área de superfície do ânodo em estudo

Para a obtenção da área da superfície foi utilizado o Scan 3D da *Shining 3D* (Figura 36). Desta forma é possível obter todos os aspectos geométricos da peça, comparando-os com os resultados obtidos antes e após a exposição da peça ao ambiente corrosivo.

Especificações do equipamento:

- Modelo: EinScan-Pro
- Modo de Scan: Automatic Scan
- Precisão da aquisição: 0,05 mm
- Velocidade de Scan: 2s por aquisição
- Número de Passagens: 60 por aquisição
- Tipo de Alinhamento: Marcadores com mesa rotativa
- Scan de textura: Marcas codificadas

- Remoção de brilhos: Utilização de pó mate
- Área de máxima de Scan: 210x150 mm
- Fonte de luz: LEDs Brancos



Figura 36: Conjunto scanner 3D utilizado para a obtenção do valor da área da superfície do ânodo

Para a obtenção de resultados precisos, aquando da união dos pontos nas diferentes aquisições, foi necessário realizar uma calibração ao sistema de forma a que as distâncias e posições relativas fossem fidedignas. Utilizou-se a placa de calibração disponibilizada pelo fabricante, como é possível visualizar na Figura 37. A posição da peça em cada aquisição não pode variar, pelo que para posições em que a peça não fique estável deve ser utilizado plasticina ou um sistema de fixação, de forma a manter a posição ao longo de toda a aquisição.



Figura 37: Passo de calibração do Scanner 3D

De forma a minimizar os erros de aquisição, utiliza-se uma base rotativa disponibilizada pelo fabricante que permite definir o incremento de rotação para a obtenção de toda a superfície de revolução da peça (Figura 38).



Figura 38: Mesa rotativa com marcas e posicionamento da amostra

Dado que o Scan 3D obtém as imagens das superfícies por sistemas ópticos, é necessário isolar o equipamento da luz aquando das aquisições. Peças muito polidas ou muito escuras introduzem muitos erros de leitura. De forma a minimizar os problemas de reflexão de luz é necessário cobrir a peça com pó de talco ou outro pó mate equivalente.

No mercado existem disponíveis equipamentos que utilizam feixes de laser para a obtenção das características das superfícies, minimizando os problemas com os brilhos. A grande desvantagem

destes equipamentos é o custo de aquisição, daí que em trabalhos que não envolvam muitas condicionantes se utilizem os equipamentos com sistemas de aquisição ópticos.

Consoante o grau de complexidade da peça para realizar o scan, poderá ser necessário realizar múltiplas aquisições de forma a que o equipamento consiga fotografar todas as superfícies. À medida que as aquisições são realizadas, o software do equipamento combina as diferentes aquisições de forma a recriar, com rigor, todas as superfícies da peça. No entanto, após cada aquisição é necessário eliminar todos os objectos externos à peça a adquirir, dado que a sua não eliminação trará ao resultado uma adição de volume e de superfícies indesejadas.

5. Resultados e Discussão

Ao longo deste capítulo são apresentados os resultados tanto da análise FMECA, como também dos ensaios de corrosão realizados.

5.1. Acções de Mitigação de risco

Após a identificação dos modos de falha, procedeu-se à sua análise de forma a serem propostas soluções de redução do risco associado às mesmas.

As possíveis causas e consequências assim como o método de detecção de cada modo de falha são identificados, de modo a compreender o impacto de cada um dos modos de falha na operacionalidade do sistema.

Na Tabela 16 são apresentados os modos de falha, os métodos de detecção, as suas causas e consequências. Adicionalmente, são propostas para cada modo de falha, as acções correctivas de forma a mitigar os seus riscos.

Tabela 16: Tabela da análise dos modos de falha completa

Função Crítica	Componente	Deteccção	Modo de Falha	Possível Causa	Possível Consequência	Acção Correctiva
Garantir a transmissão de potência à Hélice	Engrenagens	<ul style="list-style-type: none"> Sem acção da Hélice Ruído vindo da unidade inferior 	<ul style="list-style-type: none"> Sem contacto entre engrenagens 	<ul style="list-style-type: none"> Erro de dimensionamento dos dentes (Secção resistente insuficiente) Má utilização 	<ul style="list-style-type: none"> Falha catastrófica da unidade inferior provocando falhas nos componentes adjacentes Sem resposta às acções de engrenamento 	<ul style="list-style-type: none"> Projecto de alteração das engrenagens Educar os utilizadores das utilizações indevidas
Garantir o fornecimento de combustível aos injectores	Bomba Gasolina	<ul style="list-style-type: none"> Arranque difícil Falha na resposta Não funcionamento do motor Fuga no circuito 	<ul style="list-style-type: none"> Pressão Baixa 	<ul style="list-style-type: none"> Regulador de Pressão avariado 	<ul style="list-style-type: none"> Paragem motor Dificuldade em atingir certos regimes de rotação 	<ul style="list-style-type: none"> Substituição da Bomba Inspeção do circuito de combustível Análise ao combustível, quer em termos de presença de água quer de detritos
			<ul style="list-style-type: none"> Pressão Elevada 	<ul style="list-style-type: none"> Circuito de combustível bloqueado 		
			<ul style="list-style-type: none"> Falha Eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> Relay de accionamento avariado 		
			<ul style="list-style-type: none"> Falha Mecânica 	<ul style="list-style-type: none"> Impulsor desgastado 		
Garantir o fornecimento de combustível aos injectores	Injectores	<ul style="list-style-type: none"> Falha de Ignição Ralenti inconstante Potência inconstante Consumos elevados Utilização sistema de diagnostico 	<ul style="list-style-type: none"> Fornecimento de combustível ineficaz 	<ul style="list-style-type: none"> Combustível contaminado Injectores com detritos Injectores com fugas Injectores permanentemente Fechados/Abertos devido a problema eléctrico Sujidade 	<ul style="list-style-type: none"> Falha Ignição Ralenti inconstante Potência inconstante Consumos elevados 	<ul style="list-style-type: none"> Limpeza ou substituição dos injectores Análise ao combustível, quer em termos de presença de água quer de detritos. Desenvolvimento de filtros/sistemas de filtragem de combustível mais eficientes
	Separador de Vapor	<ul style="list-style-type: none"> Falha na resposta Fuga 	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilidade de manter a pressão recomendada Arrefecimento do combustível insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> Junta danificada Entupimento Bóia Bloqueada Régua de arrefecimento danificada 	<ul style="list-style-type: none"> Falha na resposta 	<ul style="list-style-type: none"> Substituição da Junta Substituição do regulador de pressão Verificação/substituição da régua de arrefecimento
Garantir e regular a temperatura de funcionamento do motor	Termostato	<ul style="list-style-type: none"> Temperatura acima do intervalo de funcionamento Temperatura abaixo do intervalo de funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> Fechado/Bloqueado Aberto ou com fuga 	<ul style="list-style-type: none"> Bloqueado Falha de concepção Corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> Danos na junta da cabeça Gripagem do motor 	<ul style="list-style-type: none"> Substituição do Termostato Projecto de alteração das características do termostato

Função Crítica	Componente	Detecção	Modo de Falha	Possível Causa	Possível Consequência	Acção Correctiva
		<ul style="list-style-type: none"> Ralenti elevado Subida do nível do óleo 				
	Bomba de Água	<ul style="list-style-type: none"> Ausência da saída de água Temperatura acima do intervalo de funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> Sem circulação de água 	<ul style="list-style-type: none"> Impulsor danificado Entupimento da entrada de água Tubos de água danificados (Latão) Corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> Danos na junta da cabeça Gripagem do motor 	<ul style="list-style-type: none"> Substituição do Impulsor/Bomba de água/Copo do Impulsor Limpeza do circuito No projecto do impulsor, poderá ser escolhido um material mais resistente ao desgaste.
Garantir a reposição da carga da bateria	Alternador/Rectificador/Regulador	<ul style="list-style-type: none"> Indicação de carga baixa Motor de arranque com pouca potência 	<ul style="list-style-type: none"> Estator danificado Rotor danificado Placa Rectificadora danificada Regulador de tensão danificado Cabos ou contactos eléctricos danificados 	<ul style="list-style-type: none"> Curto-circuito nas bobinas Díodos queimados Contactos eléctricos interrompidos Ruptura nos cabos eléctricos 	<ul style="list-style-type: none"> Bateria descarregada Falta de energia 	<ul style="list-style-type: none"> Substituição dos componentes avariados Limpeza dos contactos eléctricos
Garantir a passagem das acções de comando ao motor	Cabos de Comando Mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> Impossibilidade de arranque Sem resposta às acções de comando 	<ul style="list-style-type: none"> Sem ligação 	<ul style="list-style-type: none"> Má ligação mecânica Cabos partidos Corrosão 	<ul style="list-style-type: none"> Perda da acção de comando 	<ul style="list-style-type: none"> Limpeza e conexão Verificação dos canais de passagem e substituição dos cabos de comando
	Cabos de comando Eléctricos			<ul style="list-style-type: none"> Má ligação eléctrica Cabo partido Corrosão 		
Garantir o controlo da direcção da embarcação	Direcção Hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> Fuga de óleo Resposta da direcção aos comandos ineficaz/inexistente 	<ul style="list-style-type: none"> Fuga no circuito de óleo 	<ul style="list-style-type: none"> Rotura dos tubos de óleo do circuito da direcção Mau ajuste nas ligações dos tubos à direcção Presença de gases do circuito Retentores do êmbolo danificados 	<ul style="list-style-type: none"> Perda da acção da direcção 	<ul style="list-style-type: none"> Identificar local da fuga, reparar e voltar a sangrar Verificar se existem bolhas de ar no circuito. Se sim, voltar a sangrar
	Direcção mecânica	<ul style="list-style-type: none"> Resposta da direcção aos comandos ineficaz/inexistente 	<ul style="list-style-type: none"> Sem ligação 	<ul style="list-style-type: none"> Cabo de direcção partido Corrosão 		<ul style="list-style-type: none"> Ligação ou substituição do cabo de direcção

Função Crítica	Componente	Detecção	Modo de Falha	Possível Causa	Possível Consequência	Acção Correctiva
Garantir o início de marcha do motor	Motor de Arranque	<ul style="list-style-type: none"> • Motor de arranque sem resposta • Ruído no arranque 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotação ineficaz • Ausência de Rotação 	<ul style="list-style-type: none"> • Fraca ou falha de energia eléctrica • Escovas queimadas • Bobine de chamada • Desgaste dentes das engrenagens 	<ul style="list-style-type: none"> • Impossibilidade de iniciar o motor 	<ul style="list-style-type: none"> • Substituir o componente danificado.
Garantir a regulação da atitude da embarcação em deslocamento	Trim/Tilt	<ul style="list-style-type: none"> • Sem acção do motor de Trim/Tilt 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga de Óleo 	<ul style="list-style-type: none"> • O-ring ressequido/danificado • Corrosão do êmbolo 	<ul style="list-style-type: none"> • Impossibilidade de regular posição do motor 	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição dos retentores
			<ul style="list-style-type: none"> • Problema Eléctrico 	<ul style="list-style-type: none"> • Cabos partidos • Botão regulação com avaria • Motor Trim/Tilt com avaria • Corrosão 		<ul style="list-style-type: none"> • Substituição dos componentes eléctricos
Garantir a função dos Pistões	Segmentos	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo Excessivo de óleo • Perda de Potência • Gases de escape mais visíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo Excessivo de Óleo • Baixa Compressão em teste de compressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste dos Segmentos • Folga inapropriada 	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de Potência • Consumos mais elevados • Gases de escape mais visíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Substituição dos Segmentos • Verificação dos cilindros do motor para sinais de gripagem

Na Figura 39 apresentam-se, sob forma de gráfico de barras, os valores de RPN para cada modo de falha. Nesta figura é ainda introduzida a escala de cores apresentada no ponto 4.1, que representa os diferentes níveis de risco de inoperacionalidade considerados.

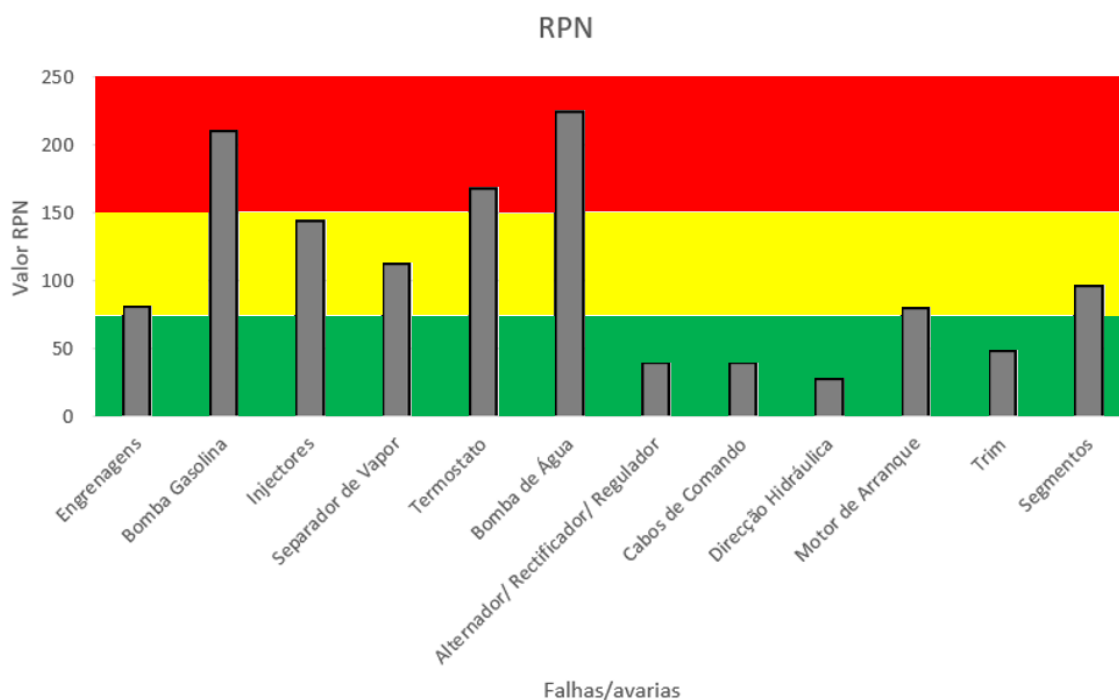


Figura 39: Gráfico de Barras com identificação do número RPN por modo de falha

Da análise da Figura 39, é possível verificar que existem três componentes críticos que apresentam um risco de inoperacionalidade alto. Desta forma, realizou-se um estudo mais aprofundado a esses componentes críticos.

- **Bomba de Gasolina**

Sendo o fornecimento de combustível essencial ao motor, os problemas que o impossibilitem implicaram um risco de operacionalidade elevado. A bomba de combustível é um dos constituintes principais do circuito de combustível, devido à necessidade da injeção do combustível no motor ter que ser feita a grande pressão.

Um dos grandes problemas constatados é a existência de impurezas e de água no circuito de combustível que provocam entupimentos, problemas na combustão e aceleram o desgaste dos componentes. Não só a bomba de combustível sofre com este problema, mas também os restantes componentes do circuito como os injectores de combustível.

Os motores marítimos sofrem mais com este problema, pois os abastecimentos quando feitos em marinas são mais propícios a contaminações.

Desta forma os sistemas de filtragem de partículas e de água do combustível devem ser melhorados. Nomeadamente com a introdução de mais pré filtros (Figura 40) ou a redução do

espaçamento entre as fibras dos filtros. A desvantagem da introdução destes sistemas, seria uma eventual introdução de mais perdas de carga ao circuito de combustível.



Figura 40: Pré filtro de combustível

- **Termostato**

Devido à combustão e ao movimento relativo entre diferentes componentes do motor, é gerado calor que necessita de ser retirado para que não ocorram gripagens devido à expansão térmica excessiva dos cilindros, segmentos e bloco. O excesso de calor torna também o processo de combustão menos eficiente e reduz a performance dos lubrificantes por diminuição da sua viscosidade.

No entanto, temperaturas baixas representam também risco para o funcionamento do motor. Os motores são projectados para operarem a uma certa temperatura. A essa temperatura, as folgas entre os segmentos e os cilindros são um compromisso ideal entre a existência de pouco atrito, no movimento relativo entre estas peças, e a obtenção de uma estanquicidade entre a câmara de combustão e a zona da cambota.

O termostato é o componente responsável pelo controlo e manutenção da temperatura ideal de funcionamento. Este é um dispositivo mecânico que, através da expansão térmica de um dos constituintes, permite abrir a passagem de água entre a bomba de água e o bloco do motor, que se encontrava fechada devido à compressão de uma mola.

Por vezes este dispositivo mecânico falha, permanecendo fechado ou aberto, levando a que a temperatura do motor fique fora do valor recomendado.

Este problema pode dever-se a uma má escolha de materiais, tanto a nível da resistência mecânica como à corrosão (Figura 41). Uma má escolha do material de expansão ou da constante de rigidez da mola pode por vezes implicar uma má regulação da temperatura do motor.



Figura 41: Termostato com falha (A união entre o perno e a chapa da válvula falhou por efeitos de da corrosão)

- **Bomba de água**

A bomba de água (Figura 42) é um dos componentes do circuito de refrigeração, responsável por impulsionar a água no circuito. Este componente, no caso dos motores fora de bordo, obtém a energia necessária para o funcionamento, através do acoplamento mecânico entre a bomba de água e o veio de transmissão de potência à hélice.

Devido à entrada de contaminantes no circuito esta vai-se desgastando ou fica entupida, levando a que o sistema de refrigeração não funcione.

Os canais de passagem da bomba para o resto do circuito de refrigeração são fabricados em latão, devido ao elevado fluxo de água e da presença de areias, leva a rotura destes canais. Por vezes falham também por efeitos de corrosão, que levam à sua rotura.

No acoplamento do veio com a bomba está o impulsor, que é fabricado em borracha e possui o formato de uma hélice, que torna o movimento da água no circuito possível. Esta peça, muitas das vezes, é a causa da má refrigeração do motor, pois degrada-se com alguma frequência. Daí ser recomendado uma alteração do material que o constitui ou a substituição do componente numa manutenção programada (manutenção preventiva).



Figura 42: Bomba de água

5.2. Disponibilidade, Taxa de Avaria e Fiabilidade

Para o cálculo da disponibilidade utilizaram-se os dados das manutenções programadas (manutenção preventiva), que estão definidas pelo fabricante. O fabricante contabiliza o ciclo de vida do motor em horas de funcionamento. Sendo que os procedimentos de manutenção e componentes a se verificar ou substituir variam de acordo com o estado de vida do motor. Aquando das manutenções, os motores são ligados a um programa de diagnóstico que permite aceder a todos os parâmetros e registos de funcionamento do motor.

Desta forma, para o cálculo da disponibilidade, assumiu-se que o tempo entre falhas do equipamento (MTBF) correspondia ao intervalo entre manutenções programadas. O tempo de reparação foi estimado com base num valor médio de realização das manutenções pelos mecânicos.

Para o cálculo da avaria, e por não haver uma recolha formal dos dados das falhas, aquando das mesmas, assumiu-se um valor para o número de componentes em falha baseado em relatos por parte dos mecânicos da rede de concessionários da marca. Considerou-se que o número de componentes em falha na missão pertencia a um total de cem componentes. Assumiu-se também que, aquando da falha, esta ocorria nos últimos 20% do tempo entre as falhas. O tempo da missão de cada componente corresponde ao tempo entre falhas.

Na Tabela 17 é possível constatar os valores da disponibilidade e da taxa de avaria para alguns dos componentes que constam da lista das manutenções programadas. O cálculo da fiabilidade foi realizado para um tempo de vida de mil horas. A tabela completa encontra-se no Anexo C.

Tabela 17: Tabela sumária dos valores de disponibilidade e da taxa de avaria por componente

Componente	N.º de componentes em Falha	Taxa de avaria λ (h ⁻¹)	Fiabilidade $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidade $\frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$
Filtro Combustível	3	$3,01 \times 10^{-4}$	73,947 79%	100	2,5	97,6%
Óleo engrenagens	3	$3,01 \times 10^{-4}$	73,947 79%	100	2,5	97,6%
Velas	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,719 46%	300	3,5	98,8%
Filtro Bomba de combustível	3	$1,0 \times 10^{-4}$	90,465 61%	300	3,5	98,8%
O-ring Bomba de combustível	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,719 46%	300	3,5	98,8%
Impulsor Bomba de água	4	$1,34 \times 10^{-4}$	87,486 14%	300	3,5	98,8%
Bomba de água	3	$6,01 \times 10^{-5}$	94,169 66%	500	4	99,2%
Correia de distribuição	3	$3,00 \times 10^{-5}$	97,042 81%	1000	5	99,5%

5.3. Análise do sistema de protecção catódica – Ensaios de corrosão

5.3.1. Medição da Intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de sacrifício para diferentes regimes de rotação do motor

Verificou-se que, após cerca duas horas de funcionamento do motor à rotação do teste, os valores da intensidade de corrente não variavam. No entanto, o ensaio foi realizado durante mais uma hora, perfazendo um total de três horas, de forma a verificar o constatado.

Os resultados das medições da intensidade de corrente entre o motor e o ânodo de protecção para diferentes regimes de rotação encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18: Valores de Intensidade de Corrente para diferentes regimes de rotação, após três horas de funcionamento do motor.

Regime de Rotação (rpm)	Intensidade de Corrente (mA)
0	49,2
750	79,2
900	74,1
1200	84,0
1700	90,4
2000	97,7
2500	99,8

Na Figura 43, apresenta-se a curva de tendência polinomial de segunda ordem, que melhor aproxima os valores de Intensidade de Corrente para diferentes regimes de rotação do motor.

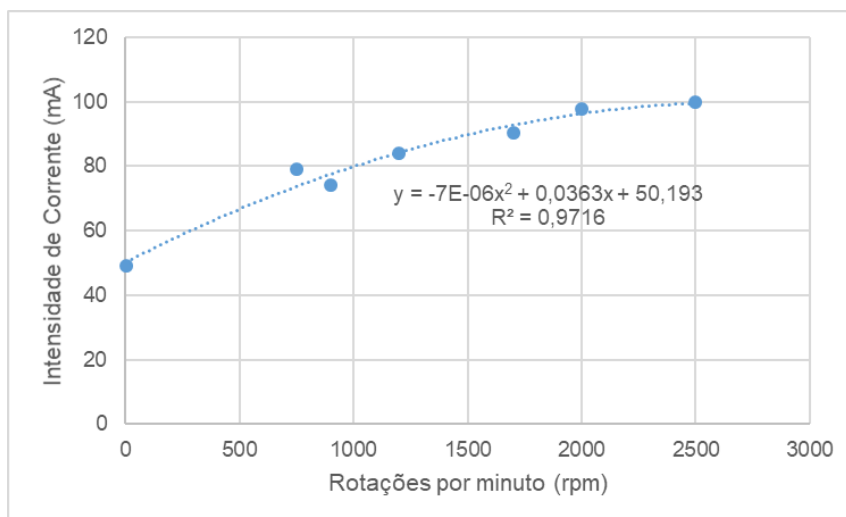


Figura 43: Curva de tendência do valor dos valores de Intensidade de Corrente para diferentes velocidades de rotação do motor.

A intensidade de corrente tem o mesmo valor nos dois eléctrodos. De forma a ser possível comparar os valores de corrente com outros casos de estudo, optou-se por normalizar para a área exposta do motor (195 260 mm²) e do ânodo de sacrifício (21 468 mm²). Na Tabela 19 são apresentados os valores da densidade de corrente para diferentes regimes de rotação.

Tabela 19: Densidade de Corrente do motor e do ânodo de sacrifício para diferentes regimes de rotação.

Regime de Rotação (rpm)	Densidade de Corrente no motor (A/m ²)	Densidade de Corrente no ânodo de sacrifício (A/m ²)
0	0,25	2,29
750	0,41	3,69
900	0,38	3,45
1200	0,43	3,91
1700	0,46	4,21
2000	0,50	4,55
2500	0,51	4,65

O valor de densidade de corrente no ânodo é cerca de 15% superior no ensaio com o motor parado do que o valor de referência (Tabela 1). O valor de densidade de corrente no motor é cerca de 66% superior no ensaio com o motor parado do que o valor de referência (Tabela 2). Os valores em ambos os casos são superiores aos valores apresentados, no entanto é de referir que nem a composição exacta do ânodo nem as condições do meio (temperatura e concentração de cloreto de sódio) em que foram retirados os resultados são mencionados. Não é referido durante quanto tempo mediram os valores. Para além disso, tanto o motor como o ânodo possuem superfícies complexas ao invés das superfícies uniformes e planas de onde foram retirados os valores de referência.

O gráfico apresentado na Figura 43 comprova o aumento esperado da intensidade de corrente com o aumento da rotação do motor e conseqüente aumento da agitação do meio. Apenas o valor da Intensidade de Corrente no ralenti não segue a regra, apresentando-se superior ao esperado. O ensaio foi realizado também em água doce, onde se verificou o mesmo comportamento.

5.3.2. Quantificação da taxa de corrosão/ penetração do ânodo

Após a duração do ensaio (31 dias), o ânodo foi retirado do motor, escovado com uma escova macia para remover sais aderentes e produtos de corrosão, enxaguado com água corrente e pesado. Com o valor da perda de massa (0,010 730 kg) e o valor médio da área (21 484,95 mm²), entre o instante inicial (21 468,48 mm²) e o instante final (21 501,42 mm²), calculou-se o valor da taxa de corrosão. Adicionalmente, calculou-se o valor da taxa de corrosão através da Lei de Faraday. Os valores obtidos foram os seguintes:

- Taxa de Corrosão (através da variação da massa no ensaio (eq.3.13)): 94 nm/hr
O valor de densidade do zinco utilizado foi 7140 kg/m³.
- Taxa de Corrosão (Lei de Faraday (eq.3.9)): 393 nm/hr
Valor obtido com massa atômica a , igual a 65 g/mol, densidade do Zinco igual a 7140 kg/m³ e valor de densidade de corrente igual a 2,3 A/m².

Tabela 20: Níveis relativos de protecção à corrosão (Adaptado de [30]).

Níveis relativos de resistência à Corrosão	Valores correspondentes a cada nível de protecção $\left(\frac{nm}{hr}\right)$
Excepcional	< 2
Excelente	2 – 10
Bom	10 – 50
Razoável	50 – 150
Fraco	150 – 500
Inaceitável	500 <

Como é possível constatar, o valor da taxa de corrosão é cerca de quatro vezes superior segundo a Lei de Faraday do que pelo valor calculado pela variação de massa do ânodo. Esta diferença pode dever-se:

- Acumulação de óxidos na superfície do ânodo visíveis na Figura 44, que contribuem para o aumento da massa final medida;
- A composição do ânodo não ser 100 % zinco. Para o cálculo da taxa de corrosão assume-se que não existem contaminantes;
- Duração dos ensaios influenciar o valor da taxa de corrosão. A taxa de corrosão tem tendência a diminuir ao longo do tempo, dado que o pH do meio se reduz e a quantidade de óxidos presentes na superfície do ânodo aumenta.

Pela Lei de Faraday obtemos um nível de resistência à corrosão fraco, enquanto se a comparação for feita com o valor da taxa de corrosão obtida pelo valor do ensaio realizado o nível de resistência à corrosão é razoável. Esta análise foi realizada apenas pela necessidade de comparar os valores obtidos no ensaio com os níveis de resistência à corrosão, pese embora o facto de os resultados não serem alarmantes por tratar-se do ânodo de sacrifício.



Figura 44: Imagem obtida pelo Scan 3D do ânodo em estudo, após os 31 dias da duração do ensaio.

5.3.3. Medição do Potencial Eléctrico do motor para diferentes áreas de exposição do ânodo

Neste ensaio foi possível verificar o efeito da variação da relação de área de exposição entre o ânodo de protecção e o motor, comparando os resultados com os valores de potencial recomendados pelo fabricante para a manutenção do potencial de protecção do motor.

A Tabela 21, apresentam-se os valores de potencial medidos para as diferentes razões de área entre a área do ânodo e a área de exposição do motor.

Tabela 21: Potencial para diferentes razões de área entre o ânodo e o motor.

Percentagem Área Exp Ânodo $\frac{A_{\text{ânodo}}}{A_{\text{cátodo}}} \times 100$	Área Exp Ânodo (mm ²)	Potencial Motor/Eléctrodo de Referência Calomelanos Saturado (mV)
0,00	0	-727
0,23	3468	-802
0,98	14468	-937
1,15	16968	-954
1,45	21468	-980

Adicionalmente mediu-se o valor do potencial entre o ânodo e o eléctrodo de referência, sem que ânodo estivesse ligado ao motor. O valor do potencial medido foi de -1034 mV.

O fabricante indica que o conjunto motor/barco deverá ter um potencial entre -800 mV e os -1000 mV relativamente a um eléctrodo de referência de Prata/Cloreto de Prata, para que a protecção catódica seja eficaz. No caso de estudo foi utilizado um eléctrodo de referência de calomelanos saturado que em relação a um eléctrodo de referência de hidrogénio possui um potencial de +241 mV, enquanto o eléctrodo de referência de Prata/Cloreto de Prata possui uma diferença de potencial de +222 mV em relação ao eléctrodo de referência de hidrogénio. Desta forma, para a comparação de resultados o intervalo de valores de potencial de protecção em relação ao eléctrodo de calomelanos saturado deverá ser de -781 mV a -981 mV [44].

Com os cinco valores medidos ajustou-se uma curva de tendência polinomial de segunda ordem (Figura 45), de forma a estimar-se o valor de área para o qual a protecção catódica era deficiente.

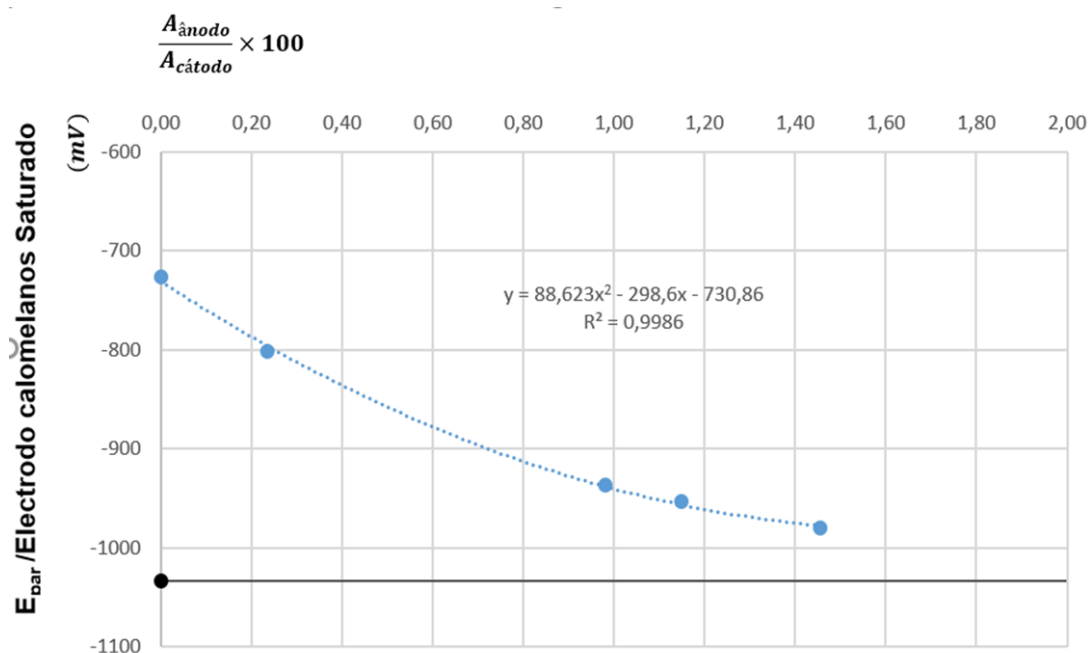


Figura 45: Curva de tendência da razão de área vs potencial.

Após a determinação da equação do polinómio, substituiu-se o valor -781 mV, na qual se obtém um valor de razão de área de cerca de 0,0018, que corresponde à área de superfície do ânodo de 2657,27 mm^2 . Este valor será, desta forma, uma aproximação ao valor de área de exposição mínima necessária do ânodo para a protecção catódica ser eficaz.

No entanto, é importante relembrar que neste ensaio o motor encontrava-se montado a um suporte ao longo dos ensaios realizados e não a um barco. Em condições normais de funcionamento pode existir ligação eléctrica entre o motor e outros componentes metálicos da embarcação que também estejam imersas na água. Nestas circunstâncias a área metálica a proteger pode aumentar substancialmente, solicitando maior corrente ao ânodo. Ou seja, é prudente utilizar um sobredimensionamento da área do ânodo de sacrifício, de modo a permitir uma intensidade de corrente superior quando necessário.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, assim como as propostas para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

A realização deste trabalho permitiu conhecer e analisar os modos de falha presentes nos motores fora de bordo, bem como estudar o processo de corrosão que os afecta.

Os motores marítimos baseiam-se em motores que normalmente provém do ramo automóvel, sofrendo ligeiras modificações, de forma a adaptá-los para a utilização em meios aquáticos. No entanto, devido ao facto de os motores marítimos enquanto em utilização trabalharem em regimes de rotação mais elevados e por longos períodos de tempo, leva a que o seu desgaste seja maior do que o que se verifica nos motores dos automóveis. Através da metodologia RAM e da análise FMECA, foi possível conhecer com grande detalhe e priorizar os modos de falha principais dos motores fora de bordo. Para as falhas mais críticas foi feita uma análise ainda mais profunda, de forma a propor alternativas viáveis que possam reduzir o risco associado às mesmas. Esta análise tem especial interesse pois na utilização das embarcações os riscos associados a uma paragem forçada, podem implicar risco para a vida dos utilizadores das embarcações.

O trabalho prosseguiu com o cálculo da disponibilidade, taxa de falha e da fiabilidade dos componentes rotáveis, substituídos nas manutenções preventivas (manutenções periódicas). Para os cálculos efectuados utilizaram-se os dados das manutenções preventivas já realizadas pela marca e também os dados vindos do conhecimento e da experiência dos mecânicos que lidam diariamente com as manutenções e reparações dos motores fora de bordo.

Dado que a corrosão é um processo que assola fortemente os motores fora de bordo, a análise realizada no trabalho incidiu também nesse processo. Os ensaios realizados tiveram como função estudar os factores que influenciam o processo de corrosão, e para isso realizaram-se três ensaios. O ensaio no qual foi medido a intensidade de corrente que circula entre o ânodo de protecção e o motor para diferentes regimes de rotação permitiu desmistificar uma constatação no mundo da náutica de que o processo de corrosão era mais intenso quando o motor se encontrava parado/desligado (0 rpm), para além de estudar como a variação da rotação do motor faz variar a intensidade de corrente que circula entre o ânodo e o motor. O ensaio da determinação da taxa de corrosão do ânodo permitiu quantificar o desgaste do ânodo e comparar o valor da taxa de corrosão com os valores tabelados na literatura. O ensaio na qual foi medido o potencial para diferentes razões de área de exposição, entre o ânodo e o cátodo, permitiu estudar o comportamento da variação do potencial para razões de áreas distintas e obter uma aproximação da razão de áreas para o qual o motor possui uma protecção catódica ineficiente.

Por fim, é possível referir que o desenvolvimento do presente caso de estudo permitiu identificar e analisar as principais falhas presentes nos motores fora de bordo, que poderão ser utilizadas pela empresa para futuros melhoramentos. Da análise dos modos de falha, concluiu-se que a maior parte destes se devem a bloqueios/ entupimentos de circuitos, erros de dimensionamento dos componentes mecânicos ou na escolha dos materiais e ao desgaste precoce de componentes. Com os resultados da disponibilidade da fiabilidade calculados, podem ser realizados ajustes aos tempos de manutenção preventiva para certos componentes. O estudo efectuado acerca da corrosão nos motores fora de bordo permitiu compreender melhor este processo e desmistificar algumas concepções erradas do processo de corrosão. Concluindo-se que a corrente de protecção catódica com ânodo sacrificial de zinco aumenta com a velocidade de rotação do motor, tendendo assintoticamente para $0,51 \text{ A/m}^2$ no motor e $4,65 \text{ A/m}^2$ no ânodo. O valor da taxa de corrosão do ânodo de sacrifício em repouso por medidas electroquímicas (393 nm/hr) e por gravimetria (94 nm/hr). Por fim, obteve-se a função do potencial do par galvânico em função $A_{\text{ânodo}}/A_{\text{motor}}$ exposta em referência ao um eléctrodo de calomelanos saturado.

6.2. Trabalhos Futuros

Neste trabalho, para o cálculo das variáveis da manutenção foram utilizados dados baseados em relatos por parte dos mecânicos, por não existir um registo formal dos dados das falhas e reparações dos equipamentos. De forma a aprimorar os resultados e aprofundar o estudo, recomenda-se que passe a existir um registo formal das reparações e substituições nas oficinas.

Após a minimização do risco associado às falhas por meio da melhoria do processo de manutenção ou novo projecto do componente/sistema, deve ser realizado uma nova análise FMECA.

Quanto ao estudo do processo de corrosão nos motores fora de bordo, o mesmo cingiu-se à análise num modelo específico. De forma a obter resultados mais gerais, devem ser repetidos os ensaios em outros modelos de forma a aferir se o processo de corrosão tem um comportamento diferente para outros motores. Para o ensaio da determinação da corrente galvânica pode ser utilizado um sistema de medição e de aquisição de dados, de forma a medir a variação da intensidade de corrente ao longo do tempo. No ensaio da determinação da taxa de corrosão, deverá ser utilizado um tempo superior de exposição do par galvânico ao meio corrosivo, de forma a que os efeitos da corrosão se tornem mais evidentes.

7. Referências

- [1] O Livro do Automóvel (1976). Lisboa, Portugal: Selecções do Reader's Digest, S.A.R.L.
- [2] Outboard Motors (2018). Explain that stuff!, <https://www.explainthatstuff.com>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [3] Boat Propelling Device (1907). Waterman Marine Motor Company, <https://patents.google.com>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [4] The Outboard Motors (2012). Marinmotor Museum, <https://marinmotormuseum.se>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [5] A Brief History of Electric Water Speed Records (2008). <https://electricrecordteam.com>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [6] Kiekhaefer Will Fete Inventor of Outboard Motor (1955). The Milwaukee Sentinel, <https://news.google.com>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [7] Cameron Beach Waterman (2017). WikiTree, <https://wikitree.com>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.
- [8] The Original Outboard Motor (1988). The Antique Outboarder, <http://www.aomci.org>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.
- [9] The History of Outboards (1957). Yachting Magazine, <https://acbs.org>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [10] Rowbot Motor Journal (2009). Some early Porto-Motor advertisements, 2 (1). Ontario, Canada: Southern Ontario Rowboat Motor Chapter.
- [11] The Outboard Motor Turns 100 (2011). Boating Magazine, <https://web.archive.org>, Acesso em 27 de Outubro de 2011.
- [12] Waterman Porto advertisement (1914). The Independent, <https://archive.org>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.

- [13] History of outboard motors in Milwaukee (2009). Journal Sentinel, <https://archive.jsonline.com>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.
- [14] Outboard Engines (2018). Honda, <https://world.honda.com>, Acesso em 15 de Setembro de 2018.
- [15] Smith, D. J. (2001). Reliability, Maintainability and Risk. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [16] Lemos, B. (2010). Análise RAMS na componente Manutenibilidade. Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado - Instituto Superior Técnico.
- [17] Bazovski, I. (1961). Reliability theory and practice. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- [18] Bilinton, R., Allen, R. (1992). Reliability Evaluation of Engineering Systems - Concepts and Techniques, New York City, New York: Plenum Press.
- [19] Abernethy, R. (2006). The New Weibull Handbook. North Palm Beach, Florida: Robert B. Abernethy.
- [20] The Weibull Distribution (2018) Reliawiki, <http://reliawiki.org>, Acedido em 3 de Setembro de 2018.
- [21] Rocha, J. (2009). Gestão da Manutenção. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Textos e apoio da disciplina Gestão da Manutenção.
- [22] Leocádio, M. N. (2004). Sobre a Incorporação RAMS no Desenvolvimento de Produto de Base Tecnológica: uma Abordagem Holística a Veículos Ferroviários. Lisboa, Portugal: Dissertação de Mestrado - Instituto Superior Técnico.
- [23] Nawabi, W., Ripke, B. (2014). RAMS and LCC for Railway Infrastructure Part 3 - RAMS - Basics, Methods and examples. Istanbul, Turkey: Systemschnittstelle Infrastruktur.
- [24] Pinto, C. V. (1999). Organização e Gestão da Manutenção. Lisboa, Portugal: Lidel.
- [25] The International Marine Contractors Association (2002). Guidance on Failure Modes & Effects Analysis (FMEAs). London, UK: IMCA.
- [26] Stamatis, D. (2003). Failure Mode Effects Analysis: FMEA from Theory to Execution (2nd edition). Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality, Quality Press.

- [27] Bhojwanib, V., Deshmukhb, S. et al (2017). Failure modes effects and criticality analysis of the linear compressor. Kidlington, UK: Elsevier Ltd.
- [28] Ahmad, Z. (2006). Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, New York City, New York: Elsevier.
- [29] Drisko, R. W., Jenkins, J. F. (2005). Corrosion and Coatings: An Introduction to Corrosion for Coatings Personnel. Pittsburgh, Pennsylvania: Society for Protective Coatings.
- [30] Fontana, M. G. (1987). Corrosion Engineering (3rd edition). New York City, New York: McGraw-Hill Book Company.
- [31] Hammood, A. S. (2014). Corrosion Mechanism of Cupronikel Alloys. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing.
- [32] Yacht Corrosion Consultants, Inc. (2006). Boat & Yacht Corrosion Control. Auburn, New Hampshire: Yacht Corrosion Consultants, Inc.
- [33] Iron Pourbaix Diagram (2018). LibreTexts <https://chem.libretexts.org>, Acedido em 4 de Agosto de 2018.
- [34] Yamaha Technical Academy (2017). Electrical Systems, Iwata, Japan: Yamaha Motor Co., Ltd.
- [35] Cathodic Protection (2014). National Physics Laboratory, <http://www.npl.co.uk>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.
- [36] Surface Area Effects in a Galvanic Situation (2018). Corrosion Doctors, <https://corrosion-doctors.org>, Acedido em 5 Agosto 2018.
- [37] O' Connor, P., Kleyner, A. (2012). Practical Reliability Engineering (5th edition). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [38] Monchy, F. (1997). La Fonction Maintenance (2nd edition). Paris, França: Elsevier Masson.
- [39] Ciek, K., Topcu, Y., Turan, H., Searslan, M. (2010). Risk-Based Preventive Maintenance Planning using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for Marine Engine Systems. New York City, New York: IEEE.

- [40] Hassankiadeh, S. J. (2011). Failure Analysis of Railway and Crossings for the purpose of Preventive Maintenance, Stockholm, Suécia: Dissertação de Mestrado - School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology.
- [41] Finkelstein, M. (2008). Failure Rate Modelling for Reliability and Risk. Berlim, Alemanha: Springer.
- [42] Roberge, P. R. (2008). Corrosion Engineering: Principles and Practice (1st edition). New York City, New York: McGraw-Hill Education.
- [43] Jovanovic, S., Zwanenburg, W. (2002) Switches and Crossings Management System: EcoSwitch. Utrecht, Holanda: European Rail Research Institute.
- [44] Reference Electrode Potentials (2018). Corrosion Doctors, <https://corrosion-doctors.org>, Acedido em 5 de Outubro de 2018.
- [45] Assis, R. (2014). Apoio à decisão na Gestão de Ativos Físicos (2nd edition). Lisboa, Portugal: Lidel.
- [46] Sobral, J. A. (2010). Utilização da Metodologia "RAMS" na Análise de Barreiras de Segurança de Instalações Industriais de Risco Elevado. Porto, Portugal: Dissertação de Doutoramento - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [47] Yacht Corrosion Consultants, Inc. (2006). Boat & Yacht Corrosion Control. Auburn, New Hampshire: Yacht Corrosion Consultants, Inc.
- [48] Millero, F. (2006) Chemical Oceanography (3rd edition). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [49] Two stroke versus four stroke outboards. Marine Engine Digest, <http://www.marineenginedigest.com>, Acedido em 15 de Setembro de 2018.

8. Anexos

- **Anexo A – Inquérito realizado aos concessionários – Falhas;**
- **Anexo B – Inquérito realizado aos concessionários – Corrosão;**
- **Anexo C – Tabela análise RAM aos componentes das manutenções programadas.**

Este inquérito tem como objectivo aferir quais os componentes que revelam efeitos de corrosão com maior frequência, detectados no decorrer da assistência dada nos motores fora de bordo pelos concessionários Yamaha, durante o ano 2017.

A informação fornecida por parte dos concessionários será utilizada numa das partes do estudo para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Nome do Concessionário:

A pergunta seguinte visa obter a proporção de motores que apresentavam sinais de corrosão em pelo menos um dos componentes.

Indique quantos motores foram sujeitos a trabalhos de manutenção ou reparação durante o período considerado?

unidades

Dos motores sujeitos a trabalhos de manutenção ou reparação, indique quantos apresentavam problemas de corrosão em algum dos seus componentes?

Assinale com "X" o grau de corrosão verificada nas peças/componentes

Peça/Componente:	Frequência de Ocorrência				Estado das Peças/Componentes com Corrosão					
	1 (Raro) a 5 (Muito frequente)				1 (Corrosão pouco visível) a 5 (Totalmente corroída)					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
caixa				x				x		
parafuso caixa				x				x		
corpo trim			x					x		

Obrigado pela vossa colaboração,
João André Luís

Anexo C

Componente	Nº de componentes em Falha	Taxa de avaria λ (h ⁻¹)	Fiabilidade	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidade
Óleo	2	$2,0 \times 10^{-4}$	81,80734 %	100	2,5	97,6%
Filtro de Óleo	3	$3,01 \times 10^{-4}$	73,94779 %	100	2,5	97,6%
Filtro Combustível	3	$2,0 \times 10^{-4}$	73,94779 %	100	2,5	97,6%
O-Ring Filtro Combustível	1	$1,0 \times 10^{-4}$	90,46561 %	100	2,5	97,6%
Cavilha Hélice	1	$1,0 \times 10^{-4}$	90,46561 %	100	2,5	97,6%
Tampão reservatório de óleo	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,71946 %	300	3,5	98,8%
Óleo engrenagens	3	$3,01 \times 10^{-4}$	73,94779 %	100	2,5	97,6%
Junta tampão óleo engrenagens	1	$1,0 \times 10^{-4}$	90,46561 %	100	2,5	97,6%
Velas	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,71946 %	300	3,5	98,8%
Filtro Bomba de combustível	3	$1,0 \times 10^{-4}$	90,46561 %	300	3,5	98,8%
O-ring Bomba de combustível	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,71946 %	300	3,5	98,8%
Junta da câmara regulador de nível	1	$3,34 \times 10^{-5}$	96,71946 %	300	3,5	98,8%
Impulsor Bomba de água	4	$1,34 \times 10^{-4}$	87,48614 %	300	3,5	98,8%
O-ring bomba de água	4	$1,34 \times 10^{-4}$	87,48614 %	300	3,5	98,8%
Bomba de água	3	$6,01 \times 10^{-5}$	94,16966 %	500	4	99,2%
Correia de distribuição	3	$3,00 \times 10^{-5}$	97,04281 %	1000	5	99,5%
Retentores das Válvulas	2	$2,00 \times 10^{-5}$	98,01908 %	1000	5	99,5%
Âodos Interiores	2	$2,00 \times 10^{-5}$	98,01908 %	1000	5	99,5%