



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**



# **Diagnóstico de Falhas num Conversor de Energia das Ondas**

**BERNARDO FERREIRA FREIRE DA CRUZ**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:

Presidente: Doutor Vítor Manuel Rodrigues Anes

Vogais:

Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão

Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

**Dezembro de 2018**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**ISEL**

# **Diagnóstico de Falhas num Conversor de Energia das Ondas**

**BERNARDO FERREIRA FREIRE DA CRUZ**

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientador:  
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Júri:  
Presidente: Doutor Vítor Rodrigues Anes  
Vogais:  
Doutor Pedro Jorge Borges Fontes Negrão Beirão  
Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

**Dezembro de 2018**



# Agradecimentos

Só seria capaz de concretizar este trabalho com a orientação e conhecimento do meu orientador Doutor Mário Mendes, pelo seu sentido crítico, dedicação e a constante disponibilidade. O meu agradecimento também ao Doutor José Sobral pela sua ajuda nas áreas da Manutenção e Fiabilidade e em geral a todos os docentes do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa que foram importantes no meu percurso e sonho profissional. Uma nota importante de agradecimento ao Centro de Engenharia Tecnologia Naval e Oceânica (CENTEC) pelo apoio no artigo publicado na conferência internacional RENEW18.

Dedico a minha dissertação aos meus pais que tanto me incentivaram e motivaram a nunca ser apenas mais um, mas alguém que tem a possibilidade de ser melhor. Aos amigos que me ocuparam os tempos livres da melhor forma. A todas as pessoas que me rodearam todos estes anos, em especial à família, transmitindo os valores que tenho hoje. Mas em especial à minha namorada que me mostrou como é ter os pés bem assentes, mas a sonhar bem alto.

Prezo que este trabalho inspire e sensibilize outras pessoas a intervir num desenvolvimento sustentável para uma pegada ecológica cada vez mais presente no planeta.

“Por estas naus os Mouros esperavam,  
Que, como fossem grandes e possantes,  
Aqueles que o comércio lhe tomavam

...

Porém a Deusa Cípria, que ordenada  
Era, pera favor dos Lusitanos,  
Do Padre Eterno, e por bom génio dada,  
Que sempre os guia já de longos anos,  
A glória por trabalhos alcançada,  
Satisfação de bem sofridos danos,  
Lhe andava já ordenando, e pretendia  
Dar-lhe nos mares tristes, alegria...”

Luís de Camões – Lusíadas (canto IX – 4 e 18)



# Resumo

Atualmente as energias renováveis são uma alternativa aos recursos petrolíferos, sendo a exploração dos recursos marítimos uma área de maior interesse científico na obtenção de energia elétrica. Deste modo, muitas são as instituições que estudam a melhor alternativa para a transformação de energia mecânica (de qualquer tipo de natureza) numa resposta elétrica favorável, que seja ilimitada e estável.

De forma a entender as diferentes formas de conversão da energia das ondas, no presente estudo foi efetuada uma revisão de todas as tecnologias desenvolvidas a nível mundial, para identificar os níveis mais relevantes de manutenção, de fiabilidade e de custo para cada tecnologia existente e com isso obter uma matriz de comparação fidedigna. Foi igualmente estudado, com base na literatura atual, um sistema de conversão de potência das ondas usando um sistema hidráulico para a conversão da energia existente offshore. Neste sistema foi feita a identificação de todas as falhas existentes, evidenciando algumas técnicas possíveis de projeto tolerante a falhas de forma a construir um sistema capaz de diagnosticar o estado dos componentes.

As técnicas utilizadas neste trabalho foram: análise por árvore de falhas, diagrama de blocos de fiabilidade (utilizando um software *Blocksim* da empresa *ReliaSoft*<sup>®</sup>) e cálculo da criticidade dos componentes dos diversos subsistemas.

A simulação do sistema estudado revelou uma probabilidade de falha elevada para a sua exequibilidade e, como tal, foi necessário desenvolver uma alternativa viável de forma a maximizar a fiabilidade do sistema.

## Palavras chave

Conversor de Energia das Ondas; Operação e Manutenção; Monitorização da Condição; Diagnóstico de Falhas;





# Abstract

Currently, renewable energy is an alternative to petroleum resources, and the exploitation of marine resources is an area of greater scientific interest in obtaining electricity. In this way, many institutions are studying the best alternative for the transformation of mechanical energy (of any kind of nature) into a favorable electric response, which is unlimited and stable.

To understand the different ways of converting wave energy, in the present study a review was made of all the technologies developed worldwide to identify the most relevant levels of maintenance, reliability and cost for each existing technology and with this gives a trustworthy comparison matrix. It was also studied, based on the current literature, a wave power conversion system using a hydraulic system for the conversion of existing offshore energy. In this system it was made the identification of all the existing faults, evidencing some possible techniques of fault tolerant design to build a system capable of diagnosing the state of the components.

The techniques used in this work were: fault tree analysis, reliability block diagram (using *Blocksim* software from *ReliaSoft*<sup>®</sup>) and calculation of the criticality of the components of the various subsystems.

The simulation of the studied system revealed a high probability of failure for its feasibility and, as such, it was necessary to develop a viable alternative to maximize the reliability of the system.

## Keywords

Wave Energy Converter; Operation and Maintenance; Condition Monitoring; Fault Diagnosis.



# Índice Geral

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Palavras chave.....	vii
Abstract .....	ix
Keywords .....	ix
Índice Geral.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas .....	xvii
Índice de equações .....	xix
Lista de Símbolos.....	xxi
Lista de Abreviaturas .....	xxiii
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Tipos de obtenção de energia do Oceano .....	4
1.4 Investigação mundial da distribuição energética marítima .....	5
1.5 Caracterização do Recurso Marítimo .....	7
1.6 Classificação dos sistemas .....	10
1.7 Organização do Volume .....	18
2. Estado de Arte dos Sistemas de Conversão.....	19
2.1 Terminadores.....	19
2.2 Absorção Pontual .....	26
2.3 Atenuador .....	30
2.4 Protótipos modernos .....	31
3. Manutenção e Diagnóstico de Falhas .....	33
3.1 Indicadores energéticos e económicos .....	33
3.2 Conceitos da Manutenção .....	36
3.3 Sistema de tolerância à falha.....	41
3.4 Sistema de isolamento e deteção da falha .....	49
3.5 Custos e níveis de manutenção .....	56
4. Caso de Estudo .....	63
4.1 Metodologia .....	63
4.2 Análise de subsistemas .....	67
4.3 Análise do sistema WEC.....	96

5. Proposta de melhoria e análise de resultados .....	99
5.1. Melhoria dos subsistemas .....	99
5.2 Análise e comparação dos resultados obtidos .....	108
6. Conclusões.....	113
6.1 Conclusões .....	113
6.2 Limitações e propostas futuras .....	114
Referências bibliográficas.....	115
7. ANEXOS .....	123
ANEXO I – Quadro das Tecnologias WECs .....	123
ANEXO II – Análise FMEA.....	128
ANEXO III – FTA do sistema WEC .....	131

# Índice de Figuras

Figura 1.1 - Mapa Mundo da distribuição energética marítima [3].....	5
Figura 1.1.2 - Mapa Marítimo de Portugal [20] .....	6
Figura 1.3 - Mapa de Energia Portuguesa [20].....	6
Figura 1.4 - Ilustração dos termos de uma onda [20] .....	7
Figura 1.5 - Forças e Momentos [34] .....	8
Figura 1.6 - Tipos de rebentação [30].....	9
Figura 1.7 - Classificação dos sistemas WEC [29] .....	10
Figura 1.8 - Onshore, Nearshore e Offshore [29].....	11
Figura 1.9 - Power Take Off (PTO) .....	12
Figura 1.10 - Tipos de Turbinas [28].....	13
Figura 1.11 - Gerador Linear [41] .....	14
Figura 1.12 - Ancoragem em cantenária e sistema TAUT-LEG [40] .....	15
Figura 1.13 - Todos os sistemas modernos de ancoragem [29].....	16
Figura 1.14 -Ancoragem em sistemas WEC [30].....	17
Figura 2.1 – Esquema Pico Power Plant [26] .....	19
Figura 2.2 - Might Whale [45].....	20
Figura 2.3 – OSPREY [44].....	20
Figura 2.4 - MRC1000 [46].....	21
Figura 2.5 - Tunneled WEC [47].....	21
Figura 2.6 – WAVEROLLER [3].....	22
Figura 2.7 – OYSTER [48].....	22
Figura 2.8 – CETO [49].....	23
Figura 2.9 - Wave Dragon [8] .....	23
Figura 2.10 – Salter’s Nodding Duck [50] .....	24
Figura 2.11 – Weptos [50].....	24
Figura 2.12 - Seawave Slot-Cone Generator [51] .....	25
Figura 2.13 – Tapchan [44] .....	25
Figura 2.14 - Archimeds Wave Swing [52].....	26
Figura 2.15 – Powerbuoy [53].....	26
Figura 2.16 - Manchester Bobber [55] .....	27
Figura 2.17- Esquema de Aquabuoy [54].....	27
Figura 2.18 – Waverider [47] .....	27
Figura 2.19 – WEGA [22] .....	28
Figura 2.20 – Wavebob[56].....	28
Figura 2.21 – Wavestar [57] .....	28
Figura 2.22 – SEAREV [56].....	29
Figura 2.23 - Penguin WEC [29].....	29
Figura 2.24 - McCabe Wave Pump [59].....	30
Figura 2.25 – Pelamis [29] .....	30
Figura 2.26 - Turbinas Offshore [60] .....	31
Figura 2.27 – ISWEC [61].....	31
Figura 2.28 – BLUSphere [62] .....	32

Figura 2.29 - Waveline Magnet WEC [63] .....	32
Figura 3.1 - Tipos de Manutenção .....	36
Figura 3.2 – Procedimento de tempo de reparação sem intervenção humana [67] .....	38
Figura 3.3 - Procedimento do tempo de reparação com intervenção humana [67] .....	38
Figura 3.4 - Tempos entre falhas .....	39
Figura 3.5 - Relação entre falhas, avarias e mau funcionamento [69] .....	41
Figura 3.6 - Ciclos de vida útil de um bem Vs taxa de avarias [69].....	42
Figura 3.7 - Custos da manutenção [74].....	48
Figura 3.8 - Relações entre monitorização e controlo [76] .....	49
Figura 3.9 - Parâmetros entre estágios do sistema.....	50
Figura 3.10 - Monitorização do LIMPET [82] .....	54
Figura 3.11 - Modelo de custos O&M [129] .....	56
Figura 3.12 - Modelos dos sistemas WEC [163].....	60
Figura 3.13 - Gestão da Manutenção .....	61
Figura 4.1 - RBD a nível componente da amarração [RS] .....	67
Figura 4.2 - Modelo físico da amarração [178] .....	68
Figura 4.3 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo da amarração [RS] .....	68
Figura 4.4 - RBD da Amarração [RS] .....	69
Figura 4.5 - Gráfico fiabilidade Vs tempo subsistema da amarração [RS] .....	69
Figura 4.6 - FTA Subsistema da amarração .....	71
Figura 4.7 - Gráfico do subsistema da amarração .....	72
Figura 4.8 Gráfico fiabilidade Vs tempo do casco [RS].....	73
Figura 4.9 - Gráfico fiabilidade Vs tempo das vedações [RS] .....	74
Figura 4.10 Gráfico fiabilidade Vs tempo das juntas [RS].....	75
Figura 4.11 RBD do Subsistema Estrutural [RS] .....	76
Figura 4.12 Gráfico fiabilidade Vs tempo do subsistema estrutural [RS].....	76
Figura 4.13 - FTA do subsistema estrutural .....	77
Figura 4.14 - Gráfico de FMEA do Subsistema Estrutural .....	78
Figura 4.15 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo Cilindro hidráulico [RS] .....	79
Figura 4.16 - Gráfico fiabilidade Vs tempo do tubo de distribuição [RS] .....	80
Figura 4.17 - Gráfico fiabilidade Vs tempo do acumulador [RS] .....	81
Figura 4.18 - Modelo esquemático do motor swashplate [183] .....	82
Figura 4.19 - Modelo esquemático do motor centrífugo com palhetas [183] .....	83
Figura 4.20 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo do motor [RS] .....	83
Figura 4.21 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo do gerador [RS] .....	84
Figura 4.22 - RBD do subsistema PTO[RS].....	85
Figura 4.23 – Gráfico de Fiabilidade Vs Tempo do subsistema PTO [RS] .....	85
Figura 4.24 - FTA do subsistema PTO .....	86
Figura 4.25 - Gráfico FMEA do subsistema PTO .....	87
Figura 4.26 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo da barra colectora [RS] .....	88
Figura 4.27 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do transformador [RS] .....	89
Figura 4.28 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo do disjuntor [RS] .....	90
Figura 4.29 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do cabo umbilical [RS] .....	91
Figura 4.30 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo dos cabos submarinhos [RS] .....	92
Figura 4.31 - RBD do subsistema transmissão elétrica [RS] .....	93
Figura 4.32 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do subsistema transmissão elétrica [RS] .....	93
Figura 4.33 - FTA do subsistema de transmissão elétrica .....	94

Figura 4.34 - RBD do sistema WEC [RS].....	96
Figura 4.35 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo do sistema WEC [RS].....	96
Figura 4.36 - Gráfico de Mínimo, Máximo e Média de cada subsistema .....	97
Figura 4.37 - Mínimo, Máximo e Média de cada Componente .....	98
Figura 5.1 - RBD Amarração max [RS] .....	99
Figura 5.2 Sistema maximizado do subsistema das amarrações [RS].....	100
Figura 5.3 - RBD do subsistema estrutural [RS] .....	102
Figura 5.4 - Maximização do subsistema estrutural [RS] .....	103
Figura 5.5 - RBD do subsistema PTO maximizado [RS].....	104
Figura 5.6 - Gráfico do subsistema PTO maximizado [RS].....	105
Figura 5.7 - RBD do subsistema de transmissão eléctrica [RS].....	106
Figura 5.8 - Análise do subsistema de transmissão eléctrica maximizado [RS] .....	107
Figura 5.9 - RBD do sistema maximizado [RS] .....	108
Figura 5.10 - Análise do sistema maximizado [RS].....	108





# Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Tecnologias Existentes e Desenvolvidas em Portugal .....	6
Tabela 1.2 - Fórmulas da velocidade vs profundidade .....	9
Tabela 1.3 - Vantagens e desvantagens Vs distância da costa .....	11
Tabela 3.1 – Tabela de Comparação do CWR [62].....	34
Tabela 3.2 - Fator modo de falha.....	44
Tabela 3.3 - Factor ambiental [71] .....	44
Tabela 3.4 - Ajuste de fator ambiental [71].....	45
Tabela 3.5 - Influências ambientais e falhas no mecanismo .....	46
Tabela 3.6 - Tipos de Controlo face ao tipo de tecnologia.....	55
Tabela 3.7 – Custos e Níveis de Manutenção de tecnologias Offshore .....	58
Tabela 3.8 - Custos e Níveis de manutenção On e Nearshore.....	60
Tabela 4.1 - Taxa de avarias dos componentes .....	64
Tabela 4.2 - Níveis da Ocorrência .....	65
Tabela 4.3 - Níveis da Severidade .....	66
Tabela 4.4 - Níveis da Detecção .....	66
Tabela 4.5 - Gráfico FMEA do Subsistema da Transmissão Electrica .....	95
Tabela 5.1 - Comparação de resultados do sistema das amarrações .....	101
Tabela 5.2 - Análise da comparação do subsistema estrutural .....	103
Tabela 5.3 - Análise da comparação do subsistema PTO.....	105
Tabela 5.4 - Comparação dos dados do subsistema trans- Electr.....	107
Tabela 5.5 - Comparação dos estados de fiabilidade.....	109
Tabela 5.6 - Comparação dos dados de vida útil com margem de erros diferentes .....	109
Tabela 5.7 - FDIRTD de todas as falhas .....	111
Tabela 7.1 - FMEA do Subsistema Segurança e Sobrevivencia .....	128
Tabela 7.2 FMEA do Subsistema Estrutural .....	129
Tabela 7.3 - FMEA do Subsistema PTO .....	129
Tabela 7.4 - FMEA do Subsistema de Transmissão Electrica .....	130



# Índice de equações

Equacção 1.1 – Onda sinusoidal .....	7
Equacção 1.2 – Ponto de espaço na direcção da onda _____	7
Equacção 1.3 – Número da onda _____	7
Equacção 1.4 - Aproximação de pierson-Moskowitz _____	8
Equacção 1.5 – Densidade do mar _____	8
Equacção 3.1 – CWR .....	33
Equacção 3.2 – COE _____ :	34
Equacção 3.3 – LCOE _____	35
Equacção 3.4 – AEP _____	35
Equacção 3.5 – MTTR _____	39
Equacção 3.6 – MTBF _____	41
Equacção 3.7 – Disponibilidade _____	42
Equacção 3.8 – Taxa de avarias _____	42
Equacção 3.9 – Weibull triparamétrica _____	42
Equacção 3.10 – Weibull biparamétrica _____	43
Equacção 3.11 – Weibull monoparamétrica _____	43
Equacção 3.12 – Taxa de avarias na distribuição de weibull monoparamétrica _____	43
Equacção 3.13 – Fiabilidade na distribuição de weibull monoparamétrica _____	43
Equacção 4.1 – RPN .....	64
Equacção 5.1 - Fiabilidade no subsistema de Controlo e Sobrevivência .....	100
Equacção 5.2 - Fiabilidade no subsistema de Estrutura _____	102
Equacção 5.3 - Fiabilidade no subsistema PTO _____	104
Equacção 5.4 - Fiabilidade no subsistema de Transmissão electrica _____	106



# Lista de Símbolos

$\omega$	Frequência
$y(t)$	Altura da onda
$A$	Amplitude da onda
$k$	Contante de desfasamento da onda
$g$	Contante da aceleração gravitacional
$K$	Número da onda
$S(\omega)$	Espectro de Pierson Moskowitz
$T_e$	Periodo de energia
$H$	Altura do periodo de energia
$t$	Tempo
$\lambda_1$	Comprimento de onda
$\alpha$	Aceleração via marítima
$\beta_c$	Constante de Pierson-Moskowitz
$P$	Densidade de energia
$\rho$	Densidade
$r$	Rácio de desconto
$n$	Tempo de vida do sistema
CF	Capacity Factor (Device)
$Av$	Device Availability Factor
$R(t)$	Fiabilidade
$f(t)$	Função da probabilidade de falha
$F(t)$	Probabilidade de falha

$tt_B$	Terreno benigno
$tt_F$	Terreno fixo
$tt_M$	Terreno móvel
$N_S$	Naval protegido
$N_U$	Naval não protegido
$N_{UU}$	Naval não protegido a baixo da linha do mar
$N_{SB}$	Naval Submarinho
$\beta$	Parâmetro de forma (Distribuição de Weibull)
$\eta$	Parâmetro de escala
$\theta$	Parâmetro de posição
$\lambda$	Taxa de avarias
O	Ocorrência
D	Deteção
S	Severidade

# Lista de Abreviaturas

ALC	Articulated Loading Column
AWS	Archimeds Wave Swing
CALM	Catenary Anchor Leg Mooring
CAPEX	Capital Expense
EMD	Empirical Mode Decomposition
FD	Fault Detetion
FI	Fault Isolation
FID	Fault Isolation Detection
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis
FT	Fault Tolerance
FTA	Fault Tree Analysis
FTS	Fault Tolerant System
FR	Fault Recovery
HPA	Heaving Point Absorber
LCOE	Levelized Cost of Electricity
MCT	Marine Current Turbine
MOWC	Multiresonance Oscilating Water Column
MTTF	Mean Time to Failure
MTTR	Mean Time to Repair
MTW	Mean Time Wasted

MCAL	Multi Catenary Anchor Leg Mooring
O&M	Operation and Maintainance
OPC	Oscilating Pitch Converter
OPEX	Operating Expense
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
OWC	Oscilatting Water Column
OWEC	Offshore Wind Energy Converter.
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
PCM	Process Control Module
PMG	Permanent Magnet Generator
PTO	Power Take Off
RAM	Reliability, Availability and Maintainability
RCA	Root Cause Analysis
RS	ReliaSoft
RCFA	Root Cause Failure Analysis
SALM	Single Anchor Leg Mooring
SPAR	Single Point mooring And Reservoir
SSG	Seawave Slot-Cone Generator
TLP	Taut Leg Point
WEC	Wave Energy Converter



---

# 1. Introdução

---

O presente capítulo tem como objetivo apresentar um enquadramento do trabalho desenvolvido na elaboração desta dissertação. Deste modo, inicia-se com a motivação na secção 1.1, seguindo-se a descrição dos objetivos na secção 1.2. Na secção 1.3 são descritas as diferentes formas de obtenção de energia no oceano, enquanto que na secção 1.4 são referidos os países que estudaram a densidade energética nas suas orlas marítimas bem como as alternativas de obtenção energética. Na secção 1.5 encontra-se a caracterização do recurso marítimo. Na secção 1.6 são catalogadas as tecnologias face ao modo de conversão no ponto de aplicação, ao seu sistema de conversão de potência e a sua ancoragem. Finalmente, na secção 1.7 é efetuada uma exposição da estrutura do documento.

## 1.1 Motivação

É impossível pensar na pegada ecológica e no desenvolvimento sustentável sem abordar as energias renováveis. A razão pela qual Portugal deve investir nesta tecnologia deve-se ao facto de que a costa portuguesa é um canal amplo para uma fonte sustentável de energia, acabando por ser uma porta para o futuro energético do país. Embora as energias renováveis relacionadas com o mar não sejam competitivas quando comparadas com tecnologias renováveis mais maduras, como a energia eólica e solar, é importante considerarmos as seguintes vantagens [1]:

- ✓ As ondas apresentam a maior densidade de energia comparadas com outras fontes de energia renováveis. Fatores de capacidade para as energias solar e eólica são 20% a 25% e 25% a 30%, respetivamente, enquanto a energia das ondas aproxima de 50%. Pode ser atingido os 90% quando implantado numa região de alta energia das ondas;
- ✓ A energia das ondas é a mais consistente das fontes de energia renováveis intermitentes uma vez que as ondas permanecem ao longo do dia, mesmo que estas se alterem em potência e tamanho facilmente previsíveis pelos movimentos meteorológicos;

✓ As ondas resultam de tempestades muito distantes no mar percorrendo longas distâncias sem perda significativa de energia. Deste modo a energia produzida a partir delas é muito mais constante e previsível, tanto no dia-a-dia como de estação para a estação. Além disso, a variabilidade sazonal natural da energia das ondas segue as exigências de eletricidade (em climas temperados);

No entanto existem alguns fatores negativos face a outras nomeadamente:

✓ Só são vantajosos em alguns pontos geográficos, como podemos verificar no próximo subcapítulo, em locais como África e Sudeste Asiático, onde existe pouco movimento marinho para que se rentabilize um investimento deste tipo de conversão;

✓ A desinformação e a falta de compreensão da tecnologia de ondas pelas indústrias, governos e público podem contribuir para o uso negligente desta tecnologia.

✓ Pode perturbar embarcações dado que os sistemas de energia das ondas do mar estejam perto de cidades povoadas de forma o acesso à energia seja rápido aos utilizadores nos sistemas *onshore* e *nearshore*;

✓ Ruído e poluição visual é uma realidade possível pois o movimento das turbinas ou dos sistemas hidráulicos, apesar da lubrificação, pode causar algum distúrbio e danificar a paisagem, quando utilizados na costa ou perto;

✓ Fraco desempenho em situações desfavoráveis e de mau tempo;

✓ Exige comprimentos e amplitudes de onda constantes para garantir um melhor desempenho;

✓ Enorme custo de construção, manutenção e testes [2] inerentes ao projeto. Também é possível ocorrer uma superestimação das cargas de projeto estrutural das tecnologias de conversão. Estas situações podem provocar um aumento nos custos de produção de energia e impacto no meio ambiente, tornando esta tecnologia ainda não competitiva.

Apesar das desvantagens descritas é possível encará-las como aspectos a desenvolver num caminho para melhoria continua deste tipo de tecnologia, e por isso, é importante considerar as vantagens como forma de garantir um desenvolvimento sustentável no ecossistema marinho e terrestre.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação assenta na temática dos conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converter* – WEC), tendo como caso de estudo um sistema *offshore* de absorção pontual com conversão hidráulica, com os seguintes objetivos:

- ✓ Análise por árvore de falhas;
- ✓ Criação de um diagrama de blocos de fiabilidade;
- ✓ Análise de criticidade das falhas possíveis, em cada componente, para todos os subsistemas da tecnologia.

Todos estes objetivos são realizados através dos conhecimentos das áreas da fiabilidade, da manutenção, controlo de condição/diagnóstico de falhas. Porém, na tentativa da aproximação deste tipo de WEC aos sistemas já mais desenvolvidos e explorados, como a energia eólica e hídrica (barragens), é importante analisar os sintomas das falhas descrevendo o diagnóstico para cada uma delas.

Com o objetivo de desenvolver um sistema WEC mais fiável, o presente estudo elabora também uma proposta de projeto tolerante com vista a maximizar a fiabilidade de todo o sistema WEC *offshore*.

## 1.3 Tipos de obtenção de energia do Oceano

Existem diversos tipos de obtenção de energia no oceano, tais como os recursos petrolíferos na área das energias não renováveis. Relativamente às energias renováveis existem os seguintes tipos:

- ✓ A **energia das ondas** é um tipo de energia renovável, onde as ondas do mar originam-se pela ação do vento sobre a superfície do mar. Como poderemos ver no capítulo 2 muitas são as formas de conversão de potência.
- ✓ A **energia das marés** (ou energia *tidal*) deriva da energia cinética ou potencial das águas que atingem menor ou maior altitude – quanto maior a amplitude da maré, maior é a quantidade de energia que se pode produzir.
- ✓ A **energia geotérmica** dos mares é obtida através das diferentes temperaturas que se encontram entre a camada mais quente à superfície e a camada mais fria no fundo do oceano, com uma diferença de pelo menos 20°C. Todos os sistemas de captação de energia térmica necessitam que um tubo de grande diâmetro bombeie a água para a superfície. É necessário efetuar vários ciclos de troca de calor para gerar eletricidade. Estes sistemas estão mais afastados do setor comercial.
- ✓ A **energia termal** dos oceanos (*ocean thermal energy converter* -OTEC) obtida através numa central, geralmente de 2 MW, que pode produzir cerca de 14.12 m<sup>2</sup> de água doce, destinada a vaporizar a água salgada. O vapor, por sua vez, faz movimentar as turbinas para a geração de energia.
- ✓ A **energia osmótica** está associada ao gradiente de salinidade, consiste na diferença de entropia entre os dois tipos de água separadas por membranas semipermeáveis para migração dos iões de sal por osmose criando assim uma corrente de baixa potência.
- ✓ A **energia hídrica** situa-se nos rios e lagos no interior do continente, onde o movimento do leito fluvial é estancado e acumulado de forma a concentrar energia potencial. Quando a massa de água é libertada passa por uma turbina em energia cinética originando uma fonte segura de geração de energia. Depois o processo fica interrompido até que exista água suficiente para a próxima descarga, muito idêntico ao que se passa em alguns sistemas *terminator*. Quanto mais alta é a superfície de galgamento maior a energia mecânica.

## 1.4 Investigação mundial da distribuição energética marítima

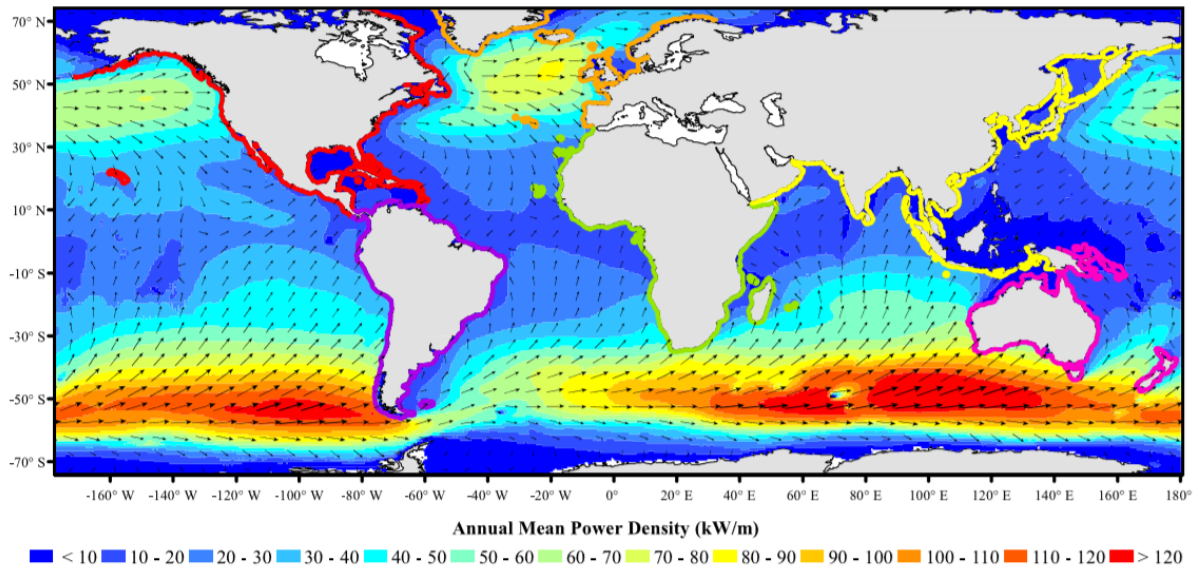


Figura 1.1 - Mapa Mundo da distribuição energética marítima [3]

Cerca de 75 % do globo terrestre é água, e 95 % desta água é proveniente dos oceanos.

Conforme a figura 1 [3] no continente africano há muito pouca exploração energética, pois não tem recursos suficientes para uma exploração controlada [4]. Existem estudos sobre a densidade energética e formas de obtenção de energia elétrica no continente americano, nomeadamente em Oregon [5], Florida [6] e Lakeview [7].

No mar que circula o continente asiático existem estudos significativos nas zonas de Fukushima [8] sobre a propriedade desta fonte de energia face ao desastre na produção de energia nuclear. No sudeste asiático [9] destaca-se a Malásia [10], o Irão [11] e o Mar Cáspio [12] indicam que as orlas marinhas são pouco relevantes para a implementação desta energia renovável.

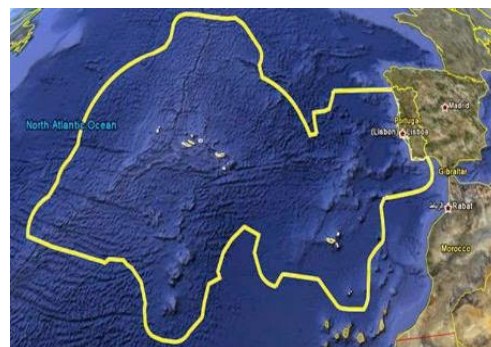
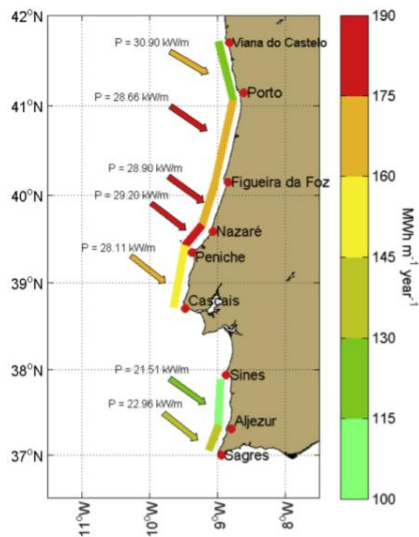
Na Europa as zonas abordadas até a data foram a Costa Calibrian [13], Espanha [14], mar báltico [15], Roménia [16], Turquia [17] e Reino Unido [18]. A Europa tem vários centros de investigação responsáveis por desenvolver primeiros sistemas WEC.

Portugal é a terceira maior potência mundial das cinco existentes, em vias de alargamento via política, no entanto 14 % da área marítima é protegida [19]. Uma vez que está situado perto do *rift*, na zona de construção de placa tectónica, o seu recurso é amplo e tende a aumentar [20]. Em Portugal existe muita potência marítima no centro norte do país [21], [22] mas também nas ilhas

como o antigo sistema WEC na ilha do Pico e na ilha da Madeira [23] existe um estudo sobre o aproveitamento energético em torno da ilha.

*Tabela 1.1 - Tecnologias Existentes e Desenvolvidas em Portugal*

Nome da tecnologia, Empresa	Localização	Ref.
FLOW, Martifer	Protótipo	[24]
Waveroller, AW Energy OY	Peniche	[25]
PICO_ Power Plant,	Açores	[26]
AWS, AWS Wave Energy	Póvoa do Varzim, Aguçadoura	[27]
Pelamis, P Wave Power	Póvoa do Varzim, Aguçadoura	[28]
WEGA, Seaforlife	Protótipo	[22]
Centipod, Ecomerit Technologie	Figueira da Foz	[29]
Windfloat	S. Pedro Moel, Marinha Grande (Aprovado e Financiado pela EDP 2018)	[30]



*Figura 1.1.2 - Mapa Marítimo de Portugal [20]*

*Figura 1.3 - Mapa de Energia Portuguesa [20]*

## 1.5 Caracterização do Recurso Marítimo

O mar é denso, estável e previsível. Os fenómenos responsáveis pela criação das ondas encontram-se à superfície, possibilitando que a densidade energética tenha uma média ponderada de 30 kW/m, entre os valores mínimos e máximos de 15 kW/m e 50 kW/m a 500 km costa atlântica [20]. Uma tecnologia *onshore* tem 80% consumo numa banda até 50 km de largura. Verifica-se também batimetria (medição da profundidade e do relevo e outros termos apresentados na figura 1.4) muito acentuada. Estes valores foram retirados dos núcleos IST /WEC e INETI. [31]

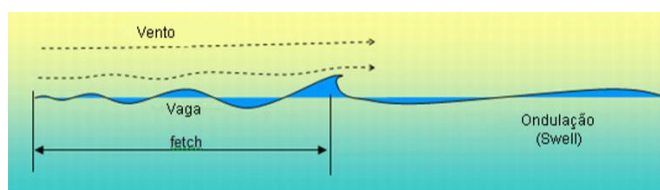


Figura 1.4 - Ilustração dos termos de uma onda [20]

Existem dois tipos de ondas: regulares e irregulares. As ondas regulares são periódicas e uniformes, enquanto que as ondas irregulares são representadas pela superposição linear de ondas regulares, com diferentes amplitudes infinitesimais, fases e frequências oscilantes similares à realidade. Para vias de simplificação uma onda sinusoidal é descrita pela seguinte fórmula das ondas regulares:

$$y(t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1.1)$$

Desta fórmula entende-se as variáveis: amplitude ( $A$ ), velocidade angular ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ), que depende inversamente ao período ( $T$ ), e o ponto do espaço na direção da onda ( $k = \frac{2\pi}{L}$ ). Este depende inversamente do comprimento da onda ( $L$ ) e inversamente da aceleração da gravidade ( $g$ ), como mostra na equação seguinte:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \coth(kh) \quad (1.2)$$

Para vias estatísticas é importante referir o número de onda com a expressão:

$$K = \frac{2\pi}{\lambda l} \quad (1.3)$$

Assentando em dados estatísticos como o espectro de Pierson-Moskowitz [32], é possível aproximar [33]:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp(-\beta c (\frac{\omega_0}{\omega})^5) \quad (1.4)$$

$$\alpha = 8,1 \times 10^{-3};$$

$$\beta_c = 0,74;$$

$$\omega_0 = g/U19,5;$$

U19,5 é a velocidade do vento a uma altura de 19,5 m acima da superfície do mar. Esta relação foi alcançada em 1964, em que H representa 1/3 da altura da onda desde o ponto mais baixo até a crista da onda. O espectro do Goda é relevante para condições mais desfavoráveis dependendo dos dois fatores H e Te (período de energia), cuja a fórmula da densidade de energia do mar [20] é dada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} Te * H^2 \quad (1.5)$$

Existem outros fatores como as marés vivas e as marés mortas, a baixa maré e a alta maré, movimento da lua que podem ser influenciados pelo movimento das placas tectónicas responsáveis pela existência de tsunamis e maremotos, não são considerados no presente estudo.

Destas forças surgem várias velocidades e potências associadas a águas de diferentes profundidades (figura 1.5). A caracterização do recurso é feita através do recurso das fórmulas clássicas de Equação de Laplace, Navier e Bernoulli considerando a água um fluido incompressível [34], assume as seguintes formulas:

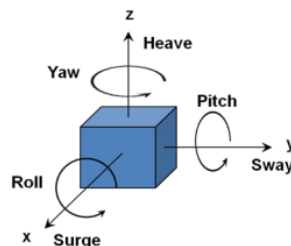


Figura 1.5 - Forças e Momentos [34]



Tabela 1.2 - Fórmulas da velocidade vs profundidade [34]

	Águas rasas	Águas intermédias	Águas profundas
Velocidade da crista ou celeridade [c]	$\sqrt{\frac{g}{2\omega}}$	$\sqrt{\frac{g}{k} * \tanh kh}$	$\sqrt{gh}$
Velocidade de grupo [Cg]	$\frac{gT}{4\pi} = \frac{c}{2}$	$\frac{c}{2} (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)})$	$\frac{gkh}{\omega} = \sqrt{gh} = c$
Potencia [Pf]	$\frac{1}{32\pi} g^2 H^2 * \rho T$	$\frac{1}{82} * g^2 H^2 \rho (1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)})$	$\frac{1}{8} * \sqrt{gh} * g^2 H^2 \rho$

Na costa, as ondas podem desenrolar de forma diferente conforme a morfodinâmica da rebentação das ondas a ter em conta nos sistemas *onshore* [34, 35, 36] identificados na figura 1.6. Nomeadamente [38]:

1) Rebentação derramada (*spilling breakers*) - o fundo do oceano tem um declive gradual e a onda tem tendência a aumentar até que a crista fique instável, resultando em águas turbulentas. Após este evento a energia da onda dissipa-se.

2) Rebentação mergulhante (*plunging breakers*) - o fundo do oceano é íngreme ou tem mudanças súbitas de profundidade. A crista da onda torna-se abrupta, o que obriga a onda a quebrar com mais impacto e energia potencial.

3) Rebentação com desabamento (*collapsing breakers*) – são originadas por um cruzamento entre o mergulho e o afloramento de uma onda na outra. No entanto, a face inferior da onda fica mais íngreme e colapsa, resultando em espuma.

4) Rebentação de aparecimento (*surging breakers*) – ondas de baixa inclinação e perfis de praia íngremes. Grande impacto e desaparecimento gradual da crista da onda.

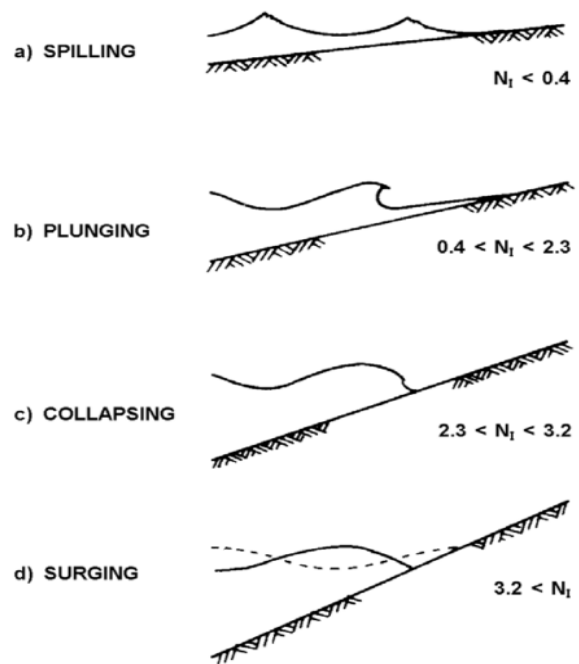


Figura 1.6 - Tipos de rebentação [30]

## 1.6 Classificação dos sistemas

### 1.6.1 Ponto de aplicação

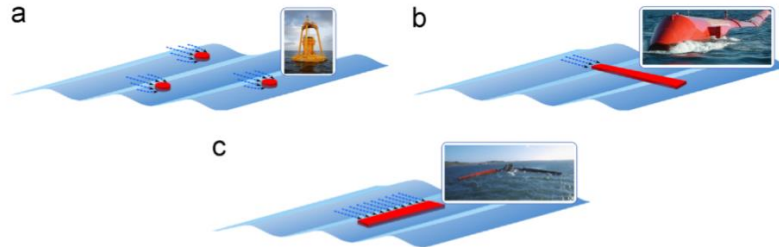


Figura 1.7 - Classificação dos sistemas WEC [29]

Podemos subdividir o tipo de tecnologia das WEC segundo o ponto de aplicação [29]:

- ✓ Os terminadores (*terminators*) (C) têm seu eixo principal paralelo à frente da onda (perpendicular à direção da onda predominante) e fisicamente interceptam as ondas. Um exemplo de uma WEC do tipo terminador é o Weptos.
- ✓ Os absorvedores pontuais (*point absorbers*) (A) dividem-se em duas subcategorias deste modelo nomeadamente em relação ao movimento: movimento translação (*heaving point absorber*) ou movimento rotação (*oscillating pitching converter*) da boia. Um absorvedor pontual é um dispositivo que possui pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda incidente. Este pode ser uma estrutura flutuante que sobe e desce na superfície da água ou uma estrutura submersa, dependendo do diferencial de pressão. Dado a sua pequena dimensão, a direção da onda não é importante para esses dispositivos. Existem inúmeros exemplos de absorvedores pontuais, um dos quais é o *Powerbuoy* da *Ocean Power Technology*<sup>®</sup>.
- ✓ Os atenuadores (*attenuators*) (B) são paralelos à predominância da onda de navegação e galgam as ondas. Um exemplo de um atenuador WEC é o *Pelamis*, desenvolvido pela *Ocean Power Distribution Ltd*<sup>®</sup> (agora conhecido como *Pelamis Wave Power*).

Protótipos mais recentes apontam formas de obtenção que derivam da energia solar, eólica, ou até de campos magnéticos, no caso de muitos protótipos atuais tais como a *Windfloat*, *Emove Floating WM3* como será descrito no capítulo 2.4.

## 1.6.2 Profundidade e distância à costa

Os sistemas WEC podem ser categorizados segundo a distância à costa ou a profundidade em

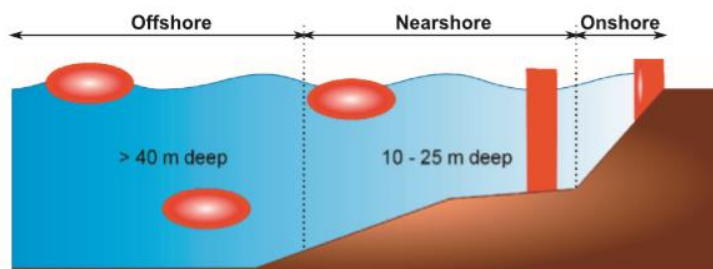


Figura 1.8 - Onshore, Nearshore e Offshore [29]

relação à linha do mar. Tendo em vista a categorização face à profundidade (figura 1.8), a primeira geração contém os sistemas colocados na costa, cuja profundidade poderá atingir os 10m. A segunda geração engloba as tecnologias colocadas com profundidades entre os 10 e os 25m e, por fim, a terceira geração diz respeito às tecnologias colocadas no mínimo a 40m. Face à categorização em relação à distância à costa, distingue-se os sistemas costeiros (*onshore* <10m), os sistemas perto da costa (*nearshore* - 10 a 20m), os sistemas intermédios (20 a 50m) e os sistemas fora da costa (*offshore* >50m). De forma a entender-se as vantagens e desvantagens destas tecnologias, considerando a distância à costa, segue-se a seguinte tabela:

Tabela 1.3 - Vantagens e desvantagens face à distância da costa

<i>Onshore</i>	<i>Offshore</i>
Vantagens	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Perto da rede de distribuição</li> <li>✓ Facilidade de manutenção</li> <li>✓ Menor robustez de construção</li> <li>✓ Fabrico menos dispendioso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ondas de grande densidade energética</li> <li>✓ Grande potência</li> </ul>
Desvantagens	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Influencia das marés</li> <li>✗ Proibida a produção em massa devido às leis de conservação da costa e da natureza</li> <li>✗ Ondas de pouca densidade energética</li> <li>✗ Pouca potência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Necessitam de grande robustez</li> <li>✗ Mais caros</li> <li>✗ Manutenção complexa.</li> </ul>

### 1.6.3 Sistema de Conversão de Potência

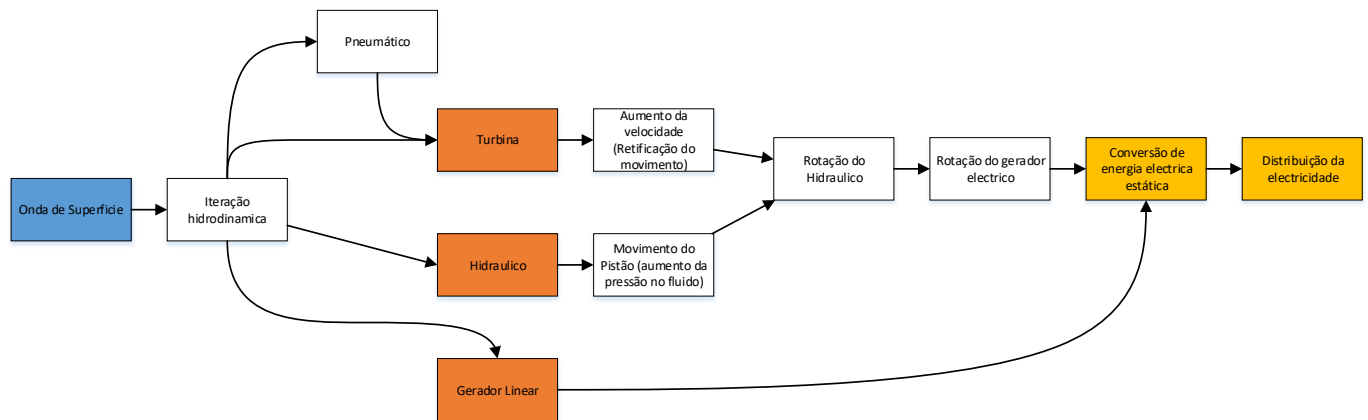


Figura 1.9 - Power Take Off (PTO)

O sistema de conversão de potência (*Power Take Off* - PTO) é o subsistema WEC responsável por transformar o input da energia cinética/potencial das ondas do mar em energia elétrica. Inicialmente foram desenvolvidas as turbinas, depois os cilindros pneumáticos hidráulicos e mais recentemente os geradores lineares. Atualmente são estudadas outras formas de conversão nomeadamente a utilização de dois conjuntos de PTO em simultâneo, como é o caso dos geradores lineares com um circuito hidráulico.

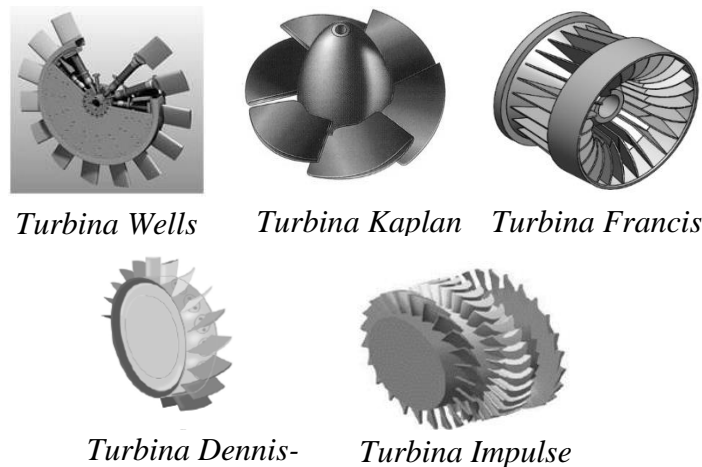
#### 1.6.3.1 Turbinas

Este sistema de conversão é utilizado em estruturas fixas como, por exemplo, estações hídricas ou parques eólicos. A parte da estação que se encontra no terreno utiliza geradores síncronos que operam a uma velocidade constante, igualando à frequência da rede. Dependendo do projeto do conversor, os geradores têm como função regular o sinal de entrada no motor. Neste sentido, existem três tipos de geradores síncronos utilizados: geradores de indução duplamente alimentados; gerador de indução em gaiola; geradores síncronos de ímãs permanentes.

Nas turbinas existe a não linearização do input da energia proveniente do mar foi resolvida através da introdução de uma caixa de velocidades ou através de conversores eletrónicos que convertem a corrente para corrente direta (DC) e novamente para corrente alternada (AC) de forma a igualar a

frequência e tensão da rede. As turbinas são dispendiosas e pode originar perdas de potência, porém permitem obter grandes quantidades de energia face ao tempo que atuam.

O gerador de indução duplamente alimentado consegue controlar a corrente e tensão no motor mantendo o gerador a funcionar em sincronismo com a rede. A força eletromotriz do gerador, gerada pela corrente de ar, permite aumentar e diminuir a velocidade em duplo sentido. Existe um pormenor importante relacionado com o estado da tecnologia que consiste em admitir que o fluído não é apenas constituído por H<sub>2</sub>O, mas também por partículas altamente corrosivas, que reduzem a eficiência do sistema.



As turbinas mais usadas (figura 1.10) são *Francis* (reação), *Wells*, *Kaplan*, *Denniss–Auld* e *Impulse turbine* (*Pelton*, *Multi-jet Pelton*, *Turgo*) nas tecnologias *Terminators – Overstopping*. Neste campo estudou-se a necessidade no formato *condition-based maintenance* para ondas extremas, cargas operacionais fortes e intermitentes, em ambiente corrosivo, bio-incrustação, distância à costa e alto custo de capital como principais desvantagens. [39] .

### 1.6.3.2 Cilindros Hidráulicos

As ondas caracterizam-se a baixas velocidades de oscilação, demonstrando que o sistema hidráulico é o método mais eficiente de conversão para estas características de recurso. Este sistema capta o movimento das ondas, através da interação do atuador e do fluído a alta pressão dentro de cilindros hidráulicos de dupla ação. Este movimento irá acionar as válvulas direcionais (para detetar o sentido do movimento do fluído a alta pressão) refletindo no movimento do motor hidráulico. A vantagem deste motor é a capacidade de fornecer ao gerador uma velocidade

constante. Contudo, a utilização de acumuladores no sistema mecânico será para regular e armazenar a energia derivada do movimento do fluido para o motor hidráulico. O projeto *Pelamis* é um bom exemplo deste tipo de PTO [40].

### 1.6.3.3 Geradores lineares

Este tipo de PTO mais moderno pressupõe uma menor necessidade de manutenção, custos mais baixos e possível rentabilidade a curto prazo comparando com os dois tipos anteriores. Este método de conversão é utilizado nos WEC como *Archimeds* e *Power Buoy*, representando a conversão direta de movimento (segundo um eixo de ação). Os geradores têm as seguintes características: geometria plana, duplo estator, duplo transladador, núcleo ferromagnético e fluxo longitudinal. O conceito deste dispositivo é a interação entre a parte fixa (estator - bobines) e a parte móvel (transladador - ímanes permanentes colocados alternadamente). O movimento vertical provocado pela boia induz uma corrente elétrica nas bobines fixadas, por exemplo, uma placa de arraste no fundo do mar. É expectável que o pico de movimento oscilatório de um WEC seja de 2m/s, ao contrário dos 5-6 m/se das turbinas, o que implica que ainda está em desenvolvimento um gerador linear que opere a baixa velocidade [41].

O fator determinante do rendimento energético deve-se ao amortecimento. Quanto maior amortecimento menor produção elétrica, e quanto mais baixo é o amortecimento maior será a dissipação existente. Quer nas ondas regulares quer nas ondas irregulares, é relevante ter atenção à dinâmica do input, e por isso quanto maior controlo e conformidade do equipamento melhor. Este input tem de ser retificado passivamente através de uma ponte de díodos ou ativamente com um retificador eletrónico.

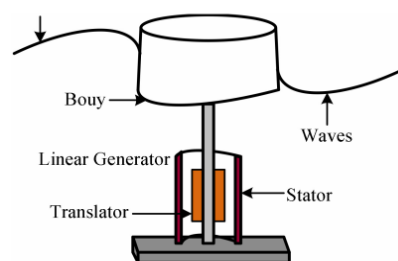


Figura 1.11 - Gerador Linear [41]

## 1.6.4 Amarração

A amarração serve para fixar o sistema WEC a um ponto geográfico de forma a retirar maiores potências através de forças inerentes nas ondas do mar impedindo movimentos indesejados da estrutura. Em termos de comparação face ao sistema convencional (figura 1.12), colocamos como *benchmarking* os veículos de transporte marítimo, as estações petrolíferas, os barcos ou mesmo boias. Existem diversos tipos de ancoragem (*mooring*) para diversos tipos de tecnologias.

A amarrações podem ser correntes, cordas de fios sintéticos com as âncoras de gravidade, de arraste embutida, de sucção acionada, de carga vertical, perfurada e rebocada e podemos categorizar da seguinte maneira [40,41]:



Figura 1.12 - Ancoragem em catenária e sistema TAUT-LEG [40]

### 1.6.4.1 Amarrações espalhadas

1. As amarrações por catenária são linhas de alta precisão suspensas e chegam na horizontal ao fundo do mar, de modo que o ponto de ancoragem está sujeito apenas a forças horizontais. As forças de restauração são geradas principalmente pelo peso das linhas de ancoragem possibilitando um sistema em equilíbrio estático.
2. As amarrações por multicatenária consiste em linhas de alta precisão que incorporam pesos e boias para formar configurações do tipo S ou Wave.
3. A amarração espalhada consiste em linhas de baixa precisão com o ponto de ancoragem capaz de resistir às forças horizontais e verticais. As forças restauradoras são geradas principalmente pela elasticidade da linha de atracação. As linhas de ancoragem de um *Taut Leg Point* TLP são ortogonais ao fundo do mar, com a força restauradora gerada principalmente pela mudança na flutuabilidade da estrutura superior.

### 1.6.4.2 Amarração de Ponto Único

1. A amarração em torre consiste numa ancoragem de baixa precisão de catenária interna ou externa anexada a uma estrutura flutuante permite a pintura à prova situações adversas ao redor da torre.
2. A amarração de perna âncora com baixa catenária (*catenary anchor leg mooring - CALM*) consiste numa estrutura flutuante de alta precisão está ancorada a uma boia catenária ancorada e é capaz de formar um catavento ao redor da boia ancorada.
3. A amarração de perna única com âncora alta (*single anchor leg mooring - SALM*) consiste numa estrutura flutuante de alta precisão e é ancorada a uma única bóia.
4. A coluna de carregamento articulada elevada (*articulated loading column -ALC*) consiste numa Uma estrutura flutuante amarrada pode ter catavento ao redor de uma coluna articulada no fundo, que tem um movimento giratório acima da linha da água.
5. A amarração de ponto único e reservatório (*single point mooring and reservoir -SPAR*) permite o armazenamento de um fluido (óleo, hidrogênio) para fixação e uma estrutura flutuante no contra o vento ao redor de um ponto de ancoragem.
6. A amarração de torre fixa consiste numa âncora no fundo do mar que permite que a estrutura flutuante amarrada atinja o catavento ao redor do ponto de ancoragem.

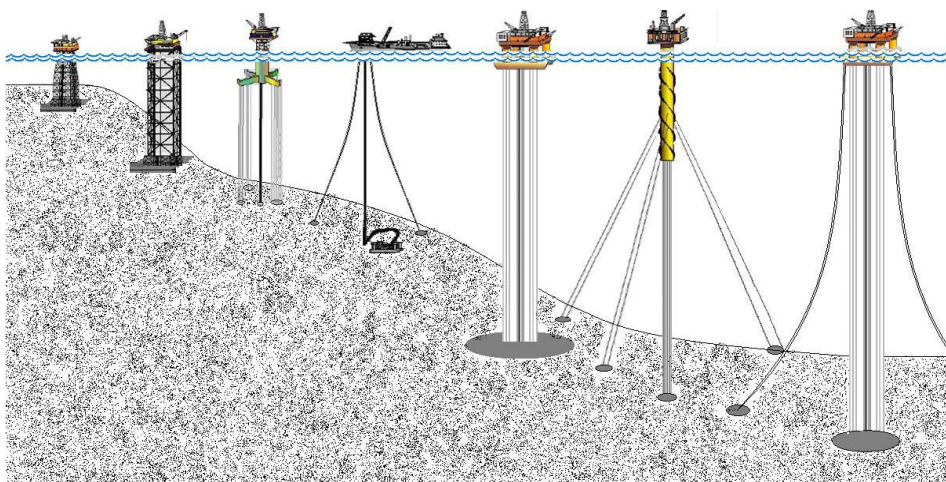


Figura 1.13 - Todos os sistemas modernos de ancoragem [29]



### 1.6.4.3 Amarrações dinâmicas

1. A amarração ativa é uma técnica de baixa precisão que consiste na fixação espalhada ao redor da estrutura flutuante, onde a extremidade interna de cada linha de fixação é mantida por um guincho controlado. Um computador central cria tensão ou solta as linhas de fixação para manter uma posição fixa no fundo do mar.
2. A propulsão é uma técnica de baixa precisão que consiste em posicionar uma estrutura flutuante acima de um ponto fixo no fundo do mar pelo uso de propulsores que são controlados a partir de um computador central.

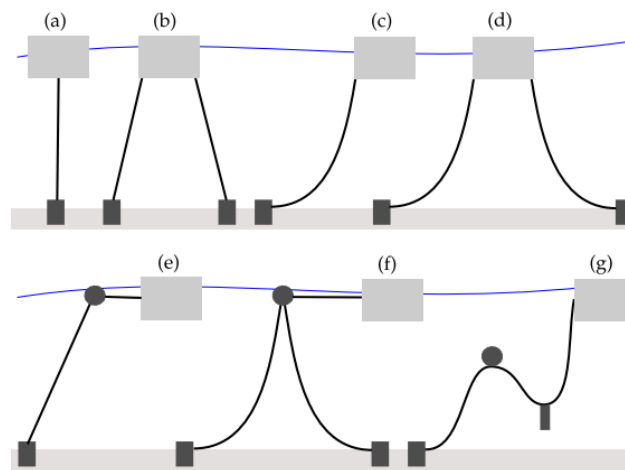


Figura 1.14 -Ancoragem em sistemas WEC [30]

Na figura 1.14 é possível comparar os diversos processos de ancoragem nos sistemas WEC: (a) Taut (b) Taut Spread (c) Catenária (d) multi-catenária (e) SALM (f) CALM (g) Lazy-s.

Neste caso de estudo apresentado no capítulo 4, o sistema de ancoragem considerado é multicatenário (*multi catenary anchor leg mooring* - MCALM) com três linhas é considerado como um sistema permanente de ancoragem.

## 1.7 Organização do Volume

O trabalho final de mestrado divide-se em 6 capítulos: 1. Introdução; 2. Estado de arte; 3. Indicadores energéticos e económicos, 4. Análise do sistema, 5. Proposta de maximização e 6. Conclusões e limitações. Após o primeiro capítulo introdutório segue-se o segundo capítulo, onde é efetuado um levantamento do estado de arte de todos os sistemas WEC, conforme o ponto de absorção de energia, bem como a caracterização de todas elas, descrevendo algumas características geométricas e modos de funcionamento.

No terceiro capítulo são destacados os indicadores energéticos e económicos para uma abordagem eficaz de comparação entre tecnologias e uma breve revisão dos conceitos fundamentais da fiabilidade e manutenção. Este capítulo termina com propostas da análise de parâmetros relevantes para a deteção de falhas.

O quarto capítulo é iniciado com a metodologia de análise aplicada e desenvolve para a análise de fiabilidade, a árvore de falhas e a análise qualitativa da criticidade de todas as falhas organizadas por subsistemas.

Em resposta ao capítulo anterior surge o quinto capítulo de forma a maximizar o sistema revisto com alternativas de projeto tolerante a falhas.

Finalizando, o sexto capítulo expõe as conclusões retiradas ao longo da realização desta dissertação bem como são sugeridas algumas ideias e melhorias para trabalho futuro, com base nas limitações que foram sendo apresentadas.

---

## 2. Estado de Arte dos Sistemas de Conversão

---

Como referimos no capítulo introdutório, os sistemas WEC dividem-se em 3 categorias face ao ponto de aplicação, designadamente os terminadores (secção 2.1), os absorsores pontuais (secção 2.2) e os atenuadores (secção 2.3). Há ainda a salientar a existência de protótipos em fase de investigação inseridos em várias categorias de PTO (secção 2.4).

### 2.1 Terminadores

#### 2.1.1 Coluna de Água Oscilante

A coluna de água oscilante (*oscillating water column* – OWC) foi das primeiras tecnologias a serem desenvolvidas. O OWC baseia-se na energia da oscilação provocada pelas ondas do mar dentro de uma câmara de ar, apta a admitir os movimentos reversíveis da maré. Este fluxo cíclico gera movimento na turbina. Nestes casos é utilizada normalmente a turbina *Wells*.

Nesta subcategoria é de destacar as tecnologias abaixo discriminadas:

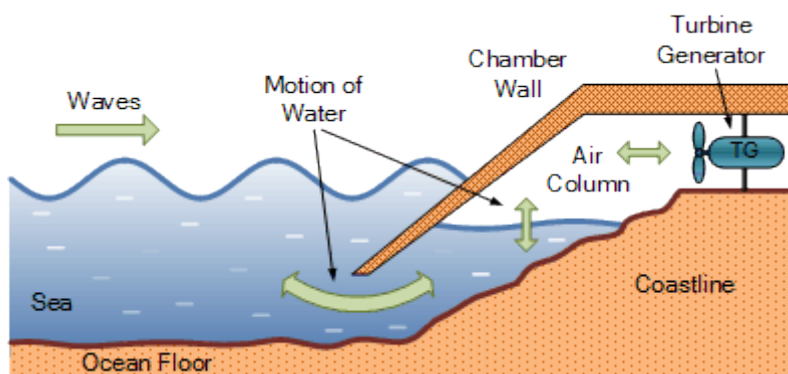


Figura 2.1 – Esquema Pico Power Plant [26]

Na costa da ilha do Pico (Açores, Portugal), a **PICO Power Plant** desenvolvida pela *Aquaret*<sup>®</sup>, foi pioneira na rede de distribuição elétrica. Utiliza uma estrutura oca construída em betão e aço, parcialmente submersa, com duas aberturas. A parte inferior da estrutura encontra-se em contacto com o mar e a parte superior com a atmosfera. Quando a onda entra na estrutura pressuriza o ar contido no seu interior, obrigando-o a sair por uma conduta, onde está montada uma turbina que converte o deslocamento da massa de ar vertical em velocidade angular. Quando a onda recua, volta a arrastar a massa de ar criando movimento reversível na turbina, ou seja, a turbina admite movimentos nos dois sentidos da mesma direcção [26]. A energia cinética nas pás (*blade*) da turbina faz acionar o gerador de indução, convertendo em energia elétrica.

Considerando as desvantagens deste tipo tecnologia, nomeadamente o baixo nível energético do movimento das ondas na costa, face ao alto nível de energia das águas profundas e os problemas de erosão (devido aos sedimentos transportados pelas ondas), foram desenvolvidos sistemas flutuantes OWC. Este tipo de tecnologia observa-se na tecnologia **OSPREY** [44] sendo uma estrutura naufragada *nearshore* (águas pouco profundas) com sistema de ancoragem TLP. Porém existem tecnologias não ancoradas como é caso do **Might Whale** [45] que possui as mesmas características mas a manutenção é mais difícil e os custos de transporte de energia mais elevados.



Figura 2.3 – OSPREY [44]

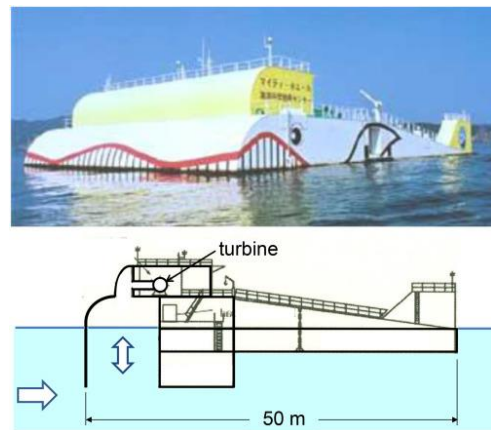


Figura 2.2 - Might Whale [45]

Ainda na obtenção offshore neste tipo de obtenção podemos referir o **MRC 1000** [46] da *Orecon*<sup>®</sup> que contrariamente ao *Osprey* e *Might Whale*, encontra-se fixo ao solo com uma amarração de ponto único e com maior número de turbinas, aumentando o rendimento energético.



Figura 2.4 - MRC1000 [46]

Por último, a tecnologia **Tunneled WEC** [47] funciona com uma coluna de água oscilante multiressonante (*multiressonance oscillating wave column - MOWC*). A *SeWave*<sup>®</sup>, em cooperação com a *Wavegen*<sup>®</sup>, desenvolveram uma nova abordagem aos OWCs onshore, baseado na detonação de diversos túneis numa falésia, ligados entre si para formar uma coluna de água. O PTO será constituído por um sistema de turbinas de ar standard. Embora existam significativas complicações durante a detonação, a empresa acredita que o projeto representa um método viável de implementação nas Ilhas Faroé dado as características costeiras.

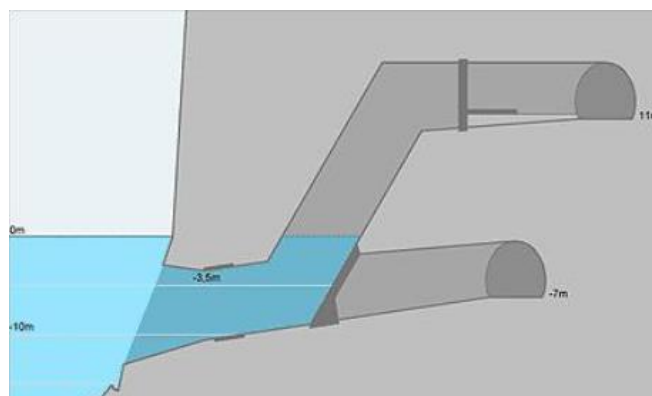


Figura 2.5 - Tunneled WEC [47]

## 2.1.2 Conversor de Onda Translação Oscilante

Na classe dos conversores de onda de translação (*oscillating wave surge converter* - OWSC), a *Aquaret*<sup>®</sup> desenvolveu o **WAVEROLLER** [3]. Esta tecnologia consiste na utilização de uma placa de articulação, fixa no fundo do mar, a profundidades até 20m e orientada perpendicularmente na direção de propagação das ondas, oscilando como um pêndulo, invertido devido ao movimento das partículas de água. A energia cinética criada nos pistões acoplados na articulação é transformada em energia elétrica através de um gerador. Existe um exemplo desta tecnologia instalada em Peniche (Portugal) a 900 m da costa, constituída por três unidades de 100kW cada, conectado à rede elétrica.

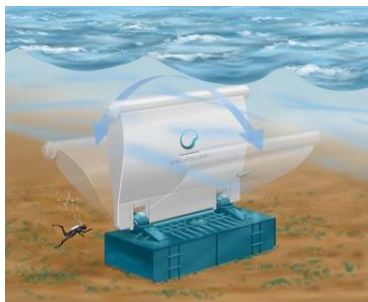


Figura 2.6 – WAVEROLLER [3]

Para ondas de maiores dimensões, a empresa *Aquamarinepower*<sup>®</sup> desenvolveu a **Oyster** [48], instalada entre 10 e 20 m de profundidade (*nearshore*). Este modelo é maior que o *Waveroller* e contém boa robustez, viabilizando o projecto a nível económico, destacando a redução de custos de manutenção. Utiliza a estrutura oca em aço que oscila com a passagem das ondas, e na sua base possui cilindros hidráulicos que são responsáveis por pressurizar um fluido para uma central que se encontra na costa. Este fluido alimenta um gerador hidráulico que é responsável pela produção da eletricidade. O fluido volta a ser canalizado de forma cíclica, por um tubo de baixa pressão, para o sistema que se encontra no mar.



Figura 2.7 – OYSTER [48]

### 2.1.3 Aparelhos Intermináveis

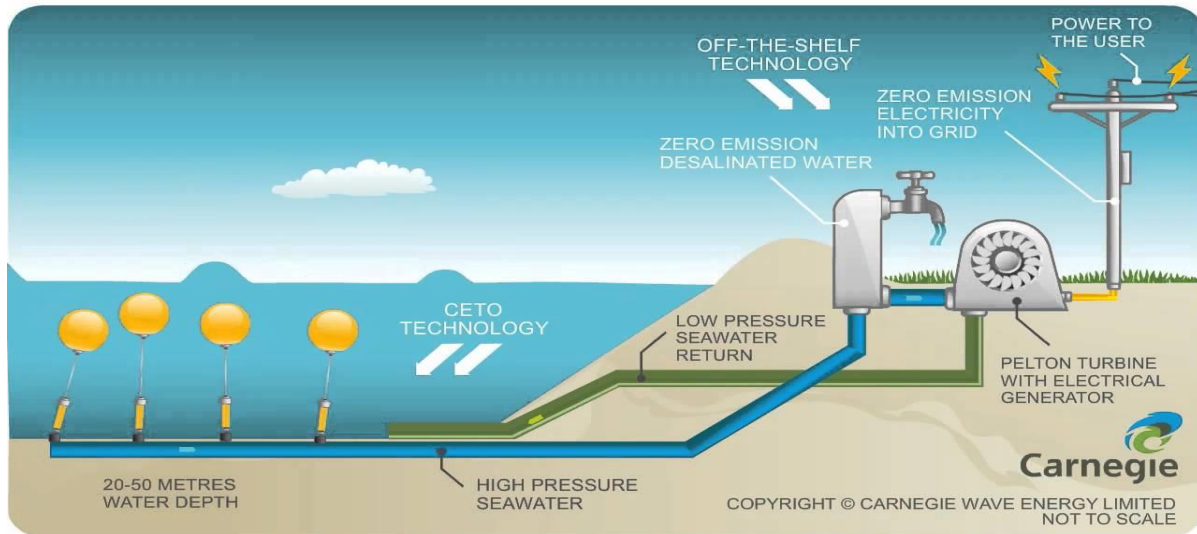


Figura 2.8 – CETO [49]

No sistemas de aparelhos intermináveis (*overstopping devices*) é de referir, o **CETO** [49] que consiste no bombeamento através do movimento linear do corpo flutuante, de um fluido de alta pressão para um gerador situado na costa que usa a diferença de pressão como forma de fonte de energia,. Esta tecnologia divide-se em duas subestações. A CETO I, que é uma subestação de osmose reversa ou hidroelectrica, inclui um actuador submerso ligado a um circuito de fluido pressurizado usando o *swell* da onda do mar. Esta energia é colectada de todos os dispositivos antes de ser realimentada para a subestação CETO II, que por sua vez realiza a conversão de energia situada em zona terrestre.

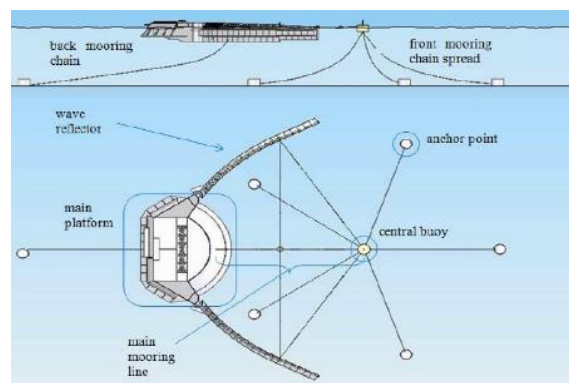


Figura 2.9 - Wave Dragon [8]

Na subcategoria de galgamento a empresa *Aquaret*<sup>®</sup> desenvolveu o **Wave Dragon** [8] projetado para ser instalado a mais de 20m de profundidade. O modo de funcionamento é idêntico à produção hídrica nas barragens hidroelétricas em rios. A estrutura deste tipo de sistema é flutuante, onde a rampa com dupla curvatura (elíptico ou circular) recolhe e direciona a água do mar num reservatório situado a um nível superior, de modo a aumentar a energia potencial associada à sua massa. De seguida, a água atravessa uma turbina tipo Pelton ou Kaplan, ligada a um gerador de íman permanente (*permanent magnet generator* - PMG) de forma a minimizar as perdas, para retornar ao mar.

**Weptos** [50], que usa mecanismos de rotação capaz de transmitir o movimento por três cilindros hidráulicos como mostra a figura 2.10 para transformar a energia cinética em energia potêncial,

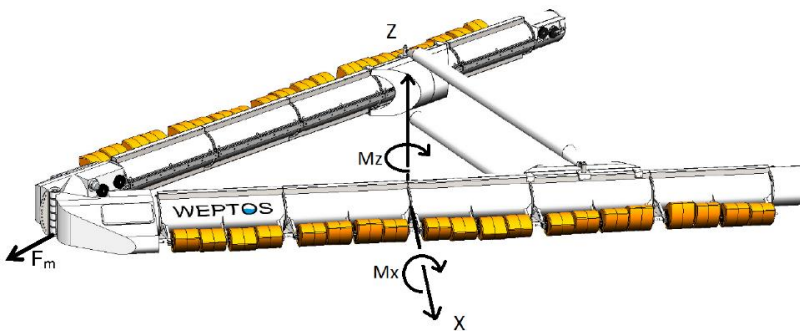


Figura 2.11 – Weptos [50]

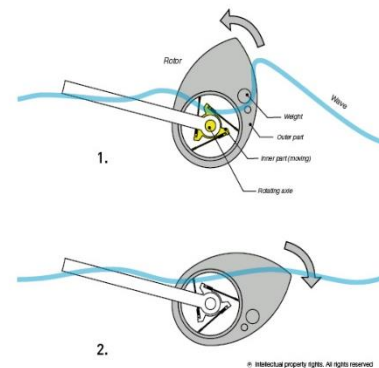
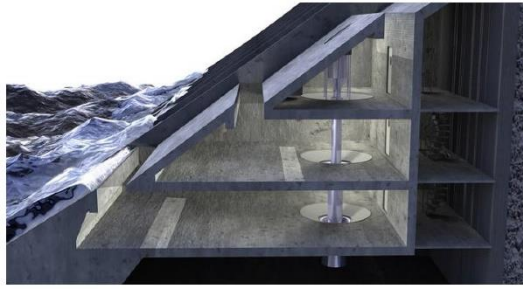


Figura 2.10 – Salter's Nodding Duck [50]

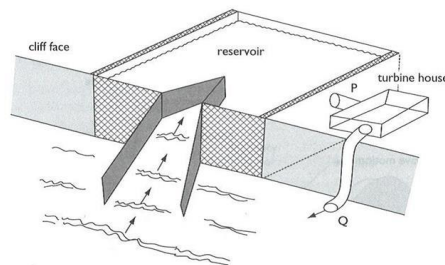
Neste caso, podemos observar o uso dos cilindros pneumáticos utilizados nos mecanismos de rotação, idêntico ao dispositivo *Salter's Nodding Duck*, que conferem uma pressão de forma rotativa em três fases diferentes, exerce a continuidade na produção de energia em ondas regulares em situações favoráveis. Neste caso, é necessário a presença de uma força num eixo que encaminhe na direção das ondas, de forma a facilitar a regularidade do input do recurso marítimo.





*Figura 2.12 - Seawave Slot-Cone Generator [51]*

Na costa foram desenvolvidos sistemas de galgamento utilizando múltiplos reservatórios sobrepostos, construídos em betão, como o sistema **Seawave Slot-Cone Generator** (SSG) [51]. Deste modo, o fluido ao passar de reservatório em reservatório, transfere a energia potencial para uma turbina multi-estágio.



*Figura 2.13 – Tapchan [44]*

Por último a **Tapchan** [44], o acrónimo das palavras *tapered channel*, é um sistema antigo, baseado numa estrutura parcialmente submersa. Esta estrutura obriga ao galgamento da massa de água, por uma rampa para um reservatório que se encontra acima da linha média do mar. Esta massa é devolvida para o oceano por condutas. As turbinas instaladas nestas condutas são responsáveis pela conversão energética.

## 2.2 Absorvor Pontual

### 2.2.1 Flutuadores de translação

Na categoria de absorvor pontual submerso (*heaving point absorber* -HPA) podemos referenciar o **Archimedes Wave Swing** [52] desenvolvido pela equipa holandesa *Teamwork Technology BV*<sup>®</sup>. Esta tecnologia retira energia pelo diferencial de pressão exercido na coluna de ar que gera um movimento vertical transformando pressão em energia elétrica por mecanismos hidráulicos e eletromecânicos. Assenta numa estrutura de aço oco submerso, que suporta dois cilindros concêntricos um dentro do outro, cujo movimento relativo criado pela ação de onda incidente. O cilindro inferior é fixo ao fundo do mar, enquanto o superior se move verticalmente, no interior, entre os dois cilindros. Este tipo de PTO hidráulico é associado em paralelo a um gerador linear para produzir electricidade.



Figura 2.14 - Archimedes Wave Swing [52]

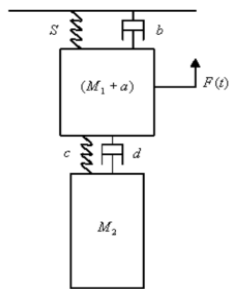


Figura 2.15 – Powerbuoy [53]

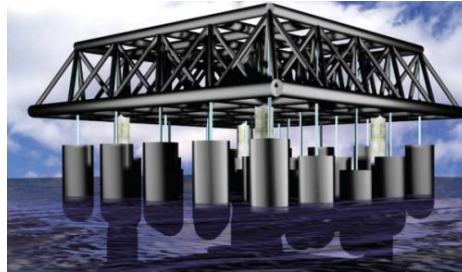
O **Powerbuoy** [53] usa uma turbina hidroelétrica não tendo restrições na amarração, ou seja, fica a flutuar ao longo da costa com profundidades superiores a 55 m. Esta tecnologia manipula a energia do movimento vertical de ondas entre 1 a 6 m de altura. Quando a agitação do mar deixa de ser normal o sistema entra em *standby*.

O dispositivo **Aquabuoy** [54] retira de uma estrutura com um tubo de aceleração onde está montada uma boia que se desloca verticalmente. O seu movimento faz circular um fluido que passa pelo dispositivo *hosepump* (situado no segundo corpo flutuador), que é responsável por gerar energia através do movimento relativo dos dois componentes. Este aparelho adapta-se facilmente à altura da maré devido à flexibilidade das amarrações. O transporte da energia para terra é feito

com o mesmo tipo de cabos usados pelas outras tecnologias. A *Aquabuoy 2.0* é constituída por uma boia com 3 m de diâmetro, ligada a um eixo com 70 m de comprimento.

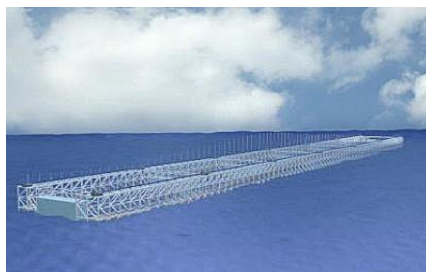


*Figura 2.17- Esquema de Aquabuoy [54]*



*Figura 2.16 - Manchester Bobber [55]*

De forma a obter mais movimento, a tecnologia **Manchester Bobber** [55] consiste num conjunto de bóias fixas numa estrutura metálica. Idêntico aos casos anteriores, a energia mecânica é gerada pelo movimento vertical das boias associado ao movimento das marés que faz rodar um tambor alimenta o gerador. Para estabelecer equilíbrio dinâmico na estrutura é necessário existir um contrapeso de forma a manter o cabo, que liga os cilindros ao tambor, sempre tenso.



*Figura 2.18 – Waverider [47]*

O caso extremo das múltiplas bóias é a **Waverider Energy** [47]. Este WEC consiste uma estrutura modular em aço carbono, com dimensões de 18 m x 13 m x 4 m. O conjunto dos diversos módulos poderão atingir uma dimensão máxima de 111 m e uma massa de cerca de 290 ton. Este enorme peso resulta da densidade do metal.

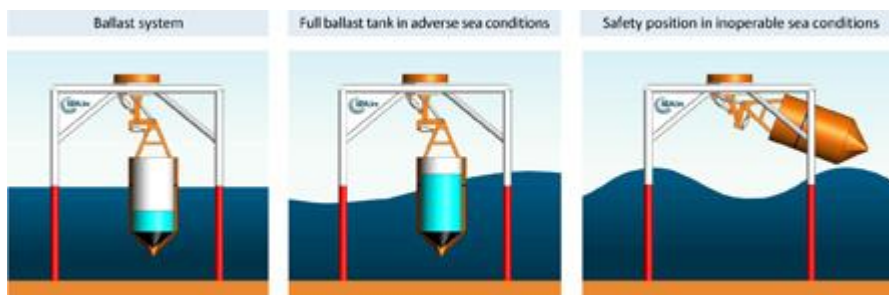


Figura 2.19 – WEGA [22]

**WEGA** [22] (*wave energy gravitational absorber*) é uma tecnologia desenvolvida, pela empresa portuguesa *Sea for Life*<sup>®</sup>, que consiste num cilindro oco em aço fixo, através de uma cabeça rotativa com dois graus de liberdade de PTO hidráulico.

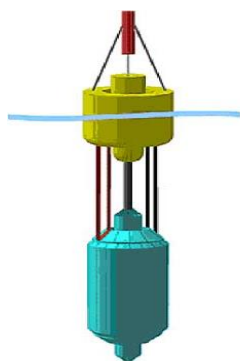


Figura 2.20 – Wavebob[56]

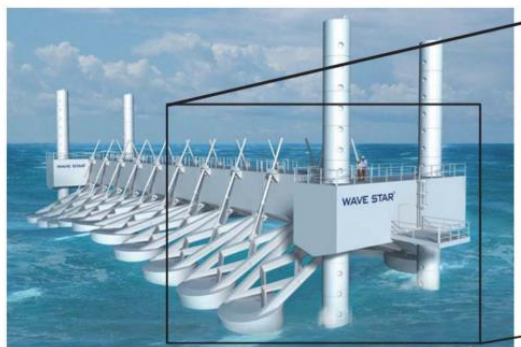


Figura 2.21 – Wavestar [57]

No aproveitamento vertical das ondas, a **Wavebob** [56] utiliza pistões que bombeiam um líquido pressurizado, fazendo-o percorrer uma turbina de eletricidade. É um dispositivo offshore que possui um sistema de amortecimento para casos mais críticos de movimento das ondas.

Finalmente nesta categoria, o **Wave Star** [57] similar ao *Waverider* contem vinte bóias em forma de hemisfério, parcialmente submersas que fazem acionar uma bomba hidráulica. A onda quando se aproxima empurra os flutuadores para cima por ordem a que estão alinhados, o que permite a continuidade de produção elétrica. O óleo comprimido (a cerca de 200 bar) utilizado é recolhido por bombas associadas a cada bóia e alimentado por um sistema de acumulação comum. A desvantagem, comparativa aos sistemas flutuantes, é a impossibilidade de movimentação da estrutura, que está fixa em dois pilares, para a direcção da onda, resultando na diminuição do seu rendimento. Em condições adversas os flutuadores são levantados como mecanismo de segurança.

## 2.2.2 Absorvor de Passo Oscilante

Contrariamente à categoria anterior que não tem aproveitamento em diversas direcções a **SEAREV** [58] é um absorvor com flutuador de rotação (*oscilating pitch absorber* - OPA). Dispõe de um pêndulo que se encontra dentro de um corpo oco. A onda, ao atravessá-lo, faz com que este oscile, e a energia cinética é absorvida pelo pêndulo que tem acoplado alguns sistemas hidráulicos, que fazem circular um fluido por um circuito que alimenta o gerador.

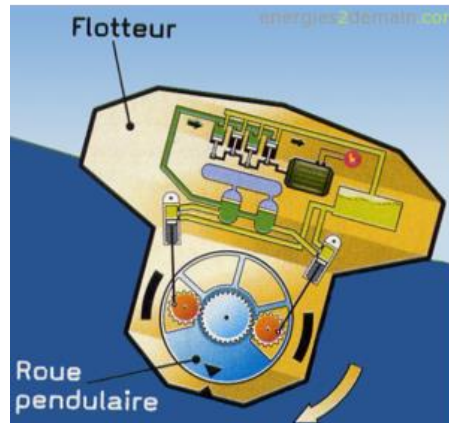


Figura 2.22 – SEAREV [56]

Com um design assimétrico, o **Penguin WEC** [29] tem um peso total de 220 ton e 30 m de comprimento. Este navio encontra-se semi-submerso, apenas com 2 m acima do nível do mar. No seu interior existe uma massa excêntrica, que roda com a passagem das ondas. Esta massa está acoplada a um gerador, que por sua vez, converte a energia mecânica (de rotação) em energia elétrica.

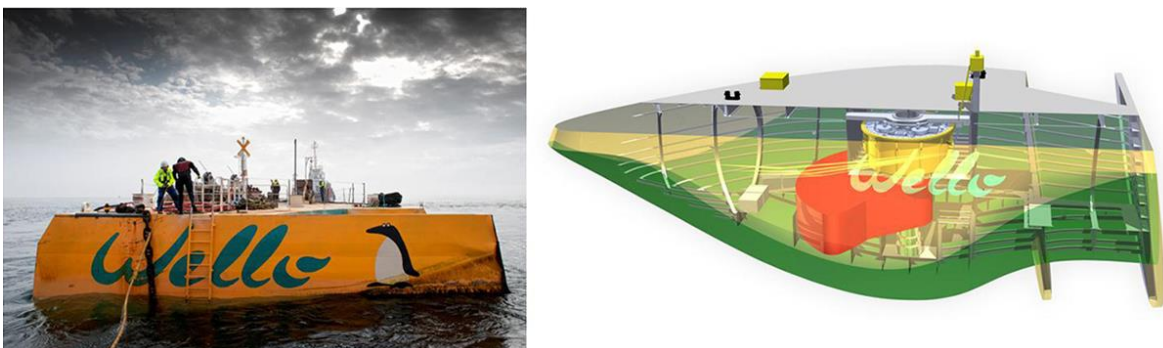


Figura 2.23 - Penguin WEC [29]

## 2.3 Atenuador

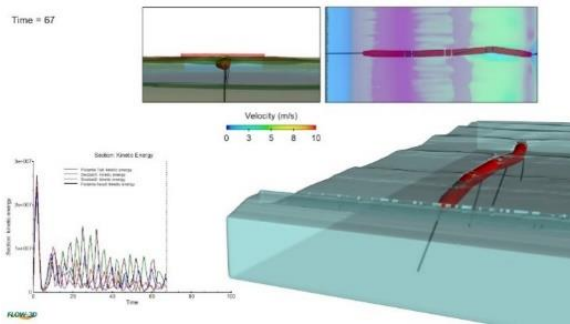


Figura 2.25 – Pelamis [29]

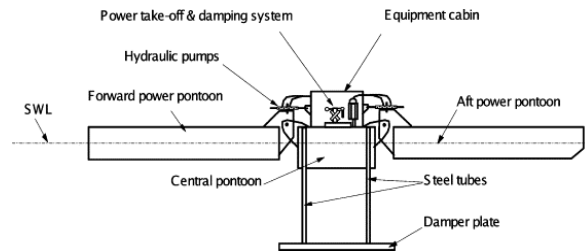


Figura 2.24 - McCabe Wave Pump [59]

A última categoria face ao ponto de aplicação é a categoria dos atenuadores. A já referida *Aquaret*<sup>®</sup> desenvolveu em Portugal na Povia do Varzim/ Aguçadoura o **Pelamis** [29]. Trata-se de uma estrutura de aço semi-submersa, com 120 m de comprimento e 3,5 m de diâmetro. Divide-se em 3 módulos de conversão de energia (*power converter module* -PCM), ligados por articulações hidráulicas, alinhados na direcção da propagação da onda. Quando as ondas atingem a estrutura, cada PCM movimenta-se em dois eixos independentes que são deslocados 90° um do outro, permitindo que a oscilação ocorra em qualquer direcção. Nas articulações, a resistência imposta pelo funcionamento dos cilindros, faz bombear o óleo biodegradável de alta pressão através de acumuladores para os motores. Esses motores hidráulicos, por sua vez, acionam geradores de indução eléctrica. A potência total instalada do *Pelamis P-750* é de 250 kW por módulo. A electricidade atravessa os módulos chegando a proa, onde é instalado o transformador. O transformador *online* é responsável por elevar o nível de tensão (especificado pelas necessidades do projeto de interligação da rede eléctrica e as três *wave park*) antes de conectar ao cabo submarino, que é fixo no fundo do mar.

Com dois *wave park*, o **McCabe Wave Pump** [59] recorre ao movimento relativo das partes laterais que pressurizam um fluido. Este sistema foi desenvolvido pela empresa *Hydam Technology Ltd*<sup>®</sup>, que instalou um dispositivo no Estuário de Shannon, na costa Irlandesa.

A vantagem dos sistemas WEC na categoria dos Atenuadores é a redução dos danos balísticos e mecânicos pelo seu design hidrodinâmico na frente dos dispositivos. Contudo, a desvantagem é a necessidade de existência permanente do movimento das ondas.

## 2.4 Protótipos modernos

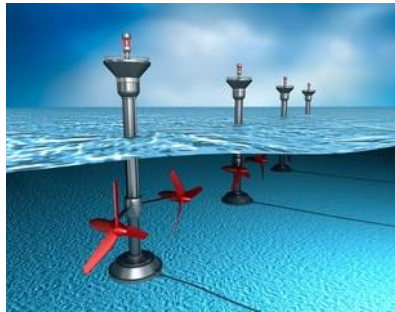


Figura 2.26 - Turbinas Offshore [60]

Existem protótipos modernos capazes de converter a potência gerada pelas ondas do mar através de diversos PTOs. O caso das turbinas *offshore* submersas como é o caso da figura 2.26 [60] que retira energia das correntes marítimas em alto mar.

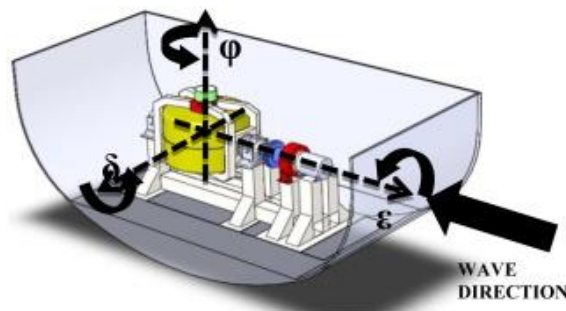


Figura 2.27 – ISWEC [61]

O **conversor WEC de inércia** (*Inertial Sea Wave Energy Converter- ISWEC*) [61] consiste num giroscópio, que se encontra dentro de uma cápsula flutuante, que origina uma reação da força de inércia à ondulação. As forças de inércia nos três eixos criam uma turbulência na bóia e o giroscópio tende a contrariar o movimento de oscilação, aumentando o binário e a velocidade de rotação. Este mecanismo, ao se encontrar dentro de uma cápsula, está protegido da corrosão da água do mar e da erosão dos sedimentos. Como se comporta como um corpo volumoso morto, resiste mais facilmente em situações adversas e apresenta-se na categoria de passo oscilante.



Figura 2.28 – BLUSphere [62]

A tecnologia **BLUSphere** [62] está a ser desenvolvida pela empresa portuguesa *Emove*<sup>®</sup>. Contém um gerador esférico no seu interior, capaz de captar a energia cinética da onda proveniente de qualquer direção. Um sistema deste género, com 3 m de diâmetro, é capaz de produzir 500 kW

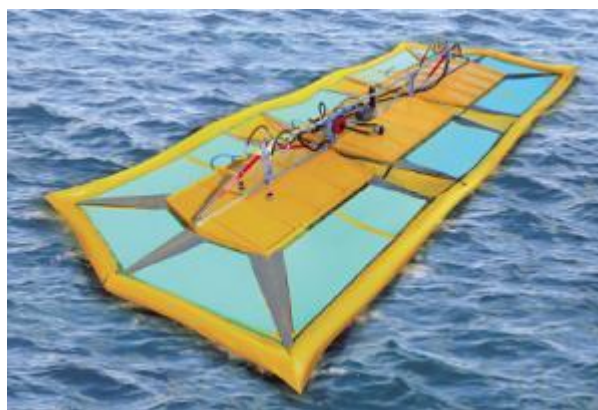


Figura 2.29 - Waveline Magnet WEC [63]

**Waveline magnet WEC** (WM7) [63] usa a força eletromagnética para produzir energia elétrica de alta eficiência a baixo custo. Este dispositivo é neutro em termos de flutuabilidade e adere à superfície da água, de modo que segue precisamente o contorno da onda à medida que a onda atravessa. Esta flutuabilidade traduz-se num impacto da vida útil desta tecnologia, sendo um factor abonatório para a implementação no oceano.

Após esta exposição sobre as tecnologias desenvolvidas e em desenvolvimento, podemos concluir que existe um campo de investigação favorável a novas formas de obtenção de energia no mar. O cerne deste campo de investigação não está no sistema de conversão de potência, mas sim no controlo dos parâmetros de forma a maximizar a energia retirada consuante a energia existente em oceano.



---

### 3. Manutenção e Diagnóstico de Falhas

---

O elo comum entre todas as tecnologias é a manutenção adequada às falhas subjacentes a cada componente. Os indicadores energéticos e económicos (secção 3.1) contêm valores comparativos inerentes às metodologias de manutenção (secção 3.2), de forma a desenvolver o sistema de tolerância à falha (secção 3.3) e o sistema de isolamento e deteção de falha (secção 3.4). Um dos fatores importantes na escolha do sistema WEC face a outra tecnologia é o fator económico, englobando o capital inicial investido e o capital de manutenção (secção 3.5) para o esforço significativo da melhoria contínua.

#### 3.1 Indicadores energéticos e económicos

O rácio de captura (*capture width ratio* - CWR) baseia-se na proporção da energia absorvida por unidade de largura do WEC dividida pela energia de onda disponível por unidade de crista de onda, como demonstra a equação 3.1.

$$CWR (\%) = \frac{\text{Potência anual absorvida pela tecnologia (kW)}}{\text{Potência retirada da onda} \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}}\right) * \text{Constante de dimensionamento (m) [B]}} \quad (3.1)$$

A análise de dados [64] indicou que as categorias menos eficientes de WECs são as OWSCs flutuadores e os *overstopping devices*, ao contrário dos OWSCs fixos e dos OWCs. É importante notar que a eficiência relaciona o desempenho da energia hidrodinâmica (absorção de energia) e não ao desempenho económico. A eficiência no PTO deve-se à taxa de conversão energética, bem como os custos de fabricação e operação que se refletem nos custos da energia.

Tecnologia	CWR (%)	Recurso (kW/m)	Característica dimensionamento (m)
Pico	20	38	12
Mighty Whale	30	12-26	2.5
Mrc 1000	176-281	12-26	32
Oyster	22	26	6
Wavedragon	21-26	24	12-26
Weptos	25	26	9.6
AWS	142	26	9.5
Aquabuoy	10-26	6	12-26
Wavebob	40-51	15	12-26
Searev	20	25	13.6
Pelamis	14-21	15	12-26

Tabela 3.1 – Tabela de Comparação do CWR [64]

É relevante afirmar que o estudo tem uma população pouco significativa face ao CWR médio em Portugal de 41%. O limite superior de absorção de energia das ondas por absorvedores de ponto assimétricos sem restrições ideais é de cerca de 1 MW em um recurso de onda de 20-30 kW/m. Os sistemas WEC têm um rendimento aproximado de 30 % isso daria 0.3 MW anuais.

O **Custo Energético** (*cost of energy* – COE) apresenta uma elevada dependência dos custos operacionais (*operational expenditure* - OPEX) e do capital investido (*capital expenditure* - CAPEX). As tecnologias avançadas de monitorização via internet (*internet of things* - IoT) ou via matrizes de ondas individuais permitem reduzir o OPEX, possibilitando um novo campo de investigação. As instituições preferem valores competitivos menos dispendiosos recorrendo a equação 3.2:

$$COE = \frac{\text{Total capital gasto} + \text{Custo da manutenção da vida útil}}{\text{Tempo de vida de energia}} \quad (3.2)$$

O **custo de energia nivelado** (*levelised cost of energy* - LCOE) é medido em quantidade económica por um MegaWatt por hora. Os rácios de desconto de 5%, 7.5% e 10% correspondem a um LCOE de 81 €/MWh, 95 €/MWh, 105 €/MWh em diferentes cenários no norte do país [65].

O LCOE é calculado através da equação 3.3

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum \frac{OPEX}{(1+r)^t}}{\sum \frac{AEP}{(1+r)^t}} \quad (3.3)$$

$r$  - Rácio de desconto

$n$  - Tempo de vida do sistema

$t$  - Ano 0 do projeto

A produção anual de energia (*anual energy production* – AEP) depende das condições da tecnologia e a disponibilidade da mesma como mostra a seguinte formula:

$$AEP = Project\ Capacity * CF * Av * 8760 \quad (3.4)$$

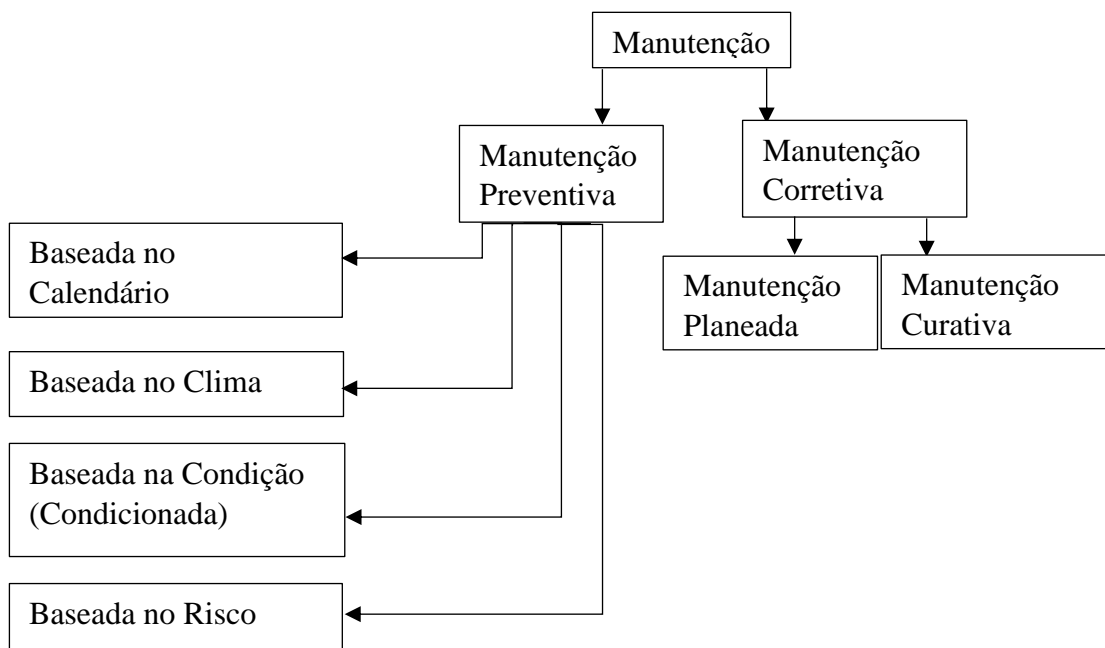
$CF$  – Fator de capacidade da tecnologia

$Av$  – Fator de disponibilidade

Considerando que em média a vida útil de uma tecnologia é de 20 anos, o cálculo da restante vida útil (*residual useful life*– RUL) [66] torna-se uma importante ferramenta de cálculo. Este cálculo pode ser interpolado dos valores de informação direta da monitorização do controlo pelos processos de regressão linear, de Wiener, Gama e Markovien. Através desta via existe considerações a tomar nomeadamente o estado de degradação do futuro item que depende muitas vezes da memória do componente da degradação atual e o a condição em que é feita a monitorização, ainda assim assenta numa distribuição de Weibull. Pelas vias indiretas mais recentes são: modelo Estocástico, Covariantes e modelos Ocultos. A existência de mais variáveis para a criação de modelos que assumam múltiplas dimensões é especialmente complicado gerir as proporções de cada parâmetro.

## 3.2 Conceitos da Manutenção

A **manutenção** segundo a norma portuguesa NP EN 13306:2007 é “a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, determinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida” com os conceitos implícitos de segurança, qualidade, custo e disponibilidade. Existem diversos tipos de manutenção:



*Figura 3.1 - Tipos de Manutenção*

A manutenção **corretiva** deve ser reservada a equipamentos de pouca importância. Enquanto a planeada existe um estudo da vida útil dos bens e é atuada conforme um plano a curativa é executada em caso de rotura/falha.

Vantagens: é eficaz para sistemas onde existem sistemas redundantes para que não exista interrupção da produção energética, e em caso de equipamentos pouco críticos pode ser uma vantagem face à manutenção preventiva.

Desvantagens: representa custos elevados em peças de substituição, serviço e mão de obra descontrolada, indisponibilidade do material ou acidentes e danos no meio ambiente.

A manutenção **preventiva sistemática** é executada com intervalos fixos de tempo de vida.

Vantagens: o custo pode ser predeterminado, o que torna a gestão financeira simples e as operações e paragens são programadas de acordo ao menor tempo possível de execução da manutenção.

Desvantagens: o custo de cada operação é elevado devido a sua frequência, existe maior probabilidade de falha humana pois existe mais manutenção, o custo de mão-de-obra pode ser elevado caso exija muita especialização, desmontagem e montagem pode criar novas e indesejáveis avarias.

A manutenção **preventiva condicionada** é realizada em função do estado dos componentes do equipamento condicionada pela necessidade. Existe quatro formas que a determinam a sua operação o tempo, por vias de inspeções periódicas, as alterações climáticas e meteorológicos, o risco e a condição (*Condition Based Maintenance* -CBM) através da monitorização (*Condition Monitoring System* -CMS).

Vantagens: Aumento do ciclo de vida do bem, controlo mais eficaz de todos os sistemas do equipamento e os sistemas redundantes, custo menor de reparação, aumento de produtividade.

Desvantagens: importante verificar todo o tipo de sensores porque caso falhem este tipo de manutenção não é eficaz.

Através da monitorização, a manutenção é realizada depois que um ou mais indicadores do equipamento acusar um desempenho reduzido. Logo são aplicados em situações onde existe sistema redundante e uma constante monitorização das condições com o relatório de falhas inerente, como podemos observar nos algoritmos nas figuras 3.2 e 3.3 [67].

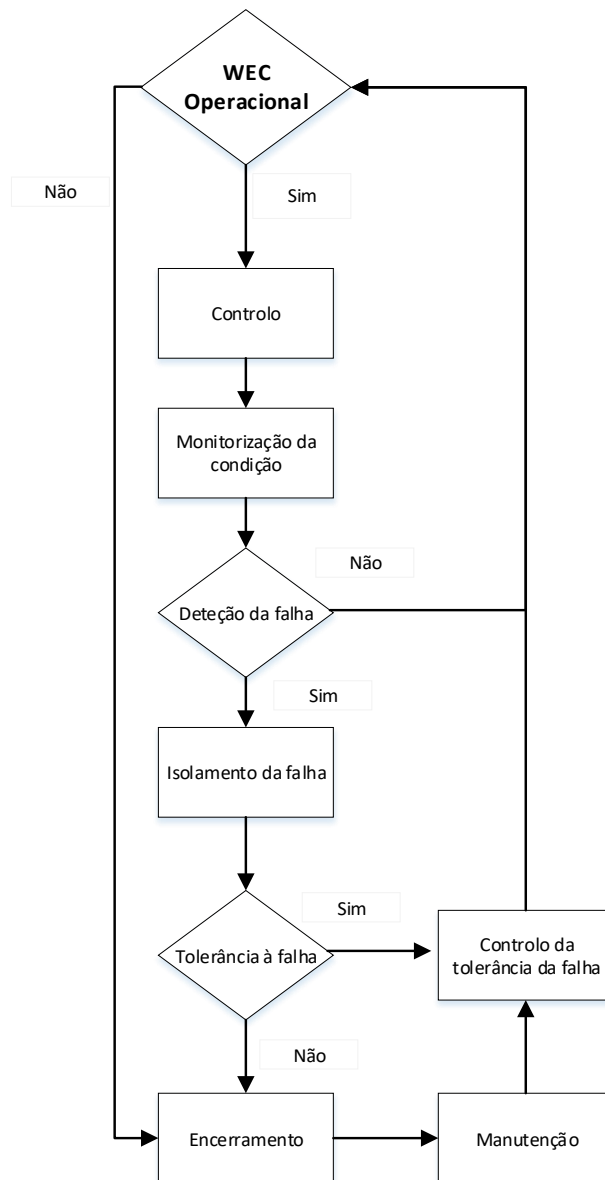


Figura 3.2 – Procedimento de tempo de reparação sem intervenção humana [67]

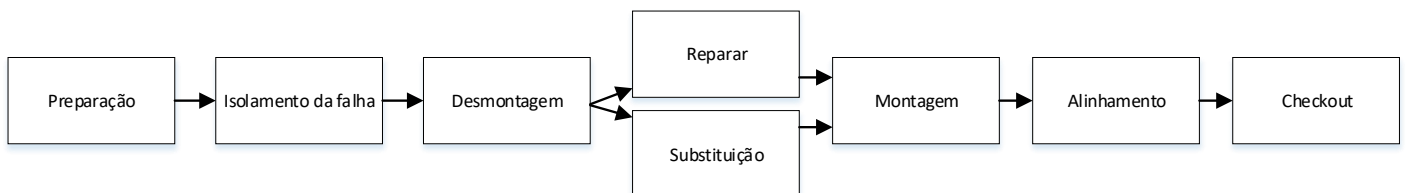


Figura 3.3 - Procedimento do tempo de reparação com intervenção humana [67]

Dos conceitos da manutenção, os indicadores que relacionam as operações e o tempo de cada fase são cruciais para a redução de custos e o rendimento da tecnologia. O **tempo entre reparações** (*mean time to repair* -MTTR) pode ser dado pela seguinte formula:

$$MTTR = \frac{TM \text{ (Tempo total de manutenção)}}{P \text{ (Número de intervalos)}} \quad (3.5)$$

Enquanto o **tempo entre falhas** (*mean time between failures* - MTBF) pode ser dado por:

$$MTBF = \frac{TD \text{ (Tempo total de disponibilidade)} - TM}{P} \quad (3.6)$$

O **tempo médio de espera** (*mean wasted time* -MWT) compreende o tempo entre a rutura até ao início da manutenção. Na realidade utópica, uma disponibilidade total englobaria todos estes conceitos no seu máximo rendimento:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTTR+MTBF+MTW} \quad (3.6)$$

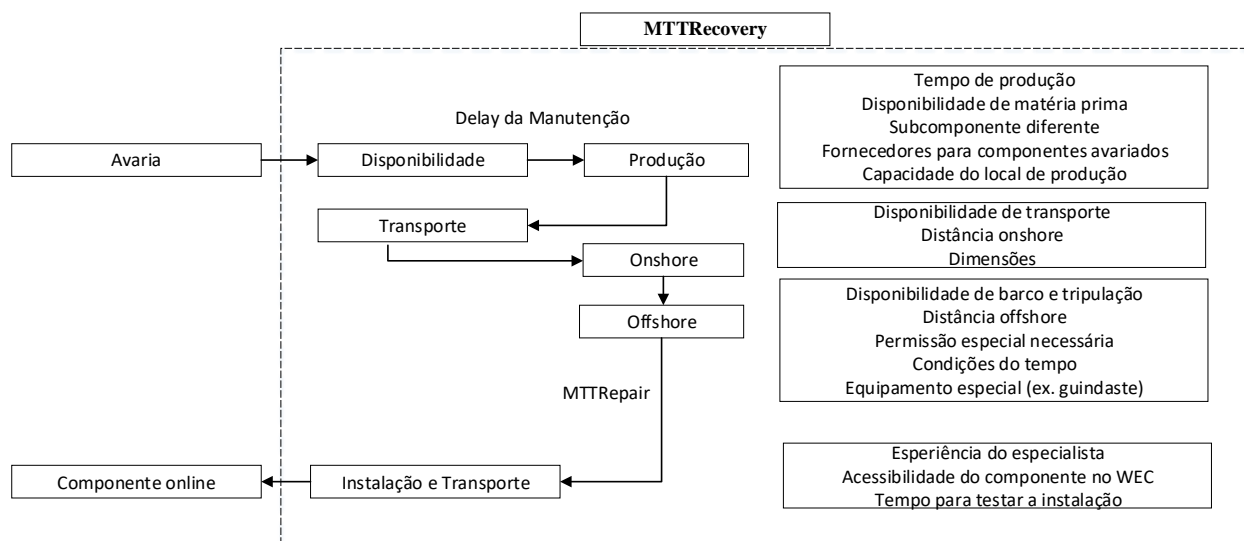


Figura 3.4 - Tempos entre falhas

A **eficiência da assistência** é definida pela rapidez e custos dos serviços de apoio durante o MWT.

**Capabilidade** é a aptidão para um elemento ou sistema de produzir dentro da especificação pretendida. Enquanto uma boa disponibilidade garante a não existência de avarias, este termo relaciona-se com a produção de material de qualidade.

**Manutabilidade** resume a rapidez e facilidade com que a manutenção pode ser executada. É medida por MTTR.

No caso das turbinas submersas existem estudos que comprovam que a detenção de falhas e o controlo por condição usando métodos empíricos (*empirical mode decomposition* - EMD) servem para eliminar o efeito da turbulência [68] testados com vários níveis de entropia e testou-se desempenhos na deteção de falhas em ambiente hostil. No caso de turbinas em sistemas WECs (*marine current turbine* - MCT) utilizou-se EMD para monitorizar, porém só antecipando os eventos adversos é que podiam assegurar uma melhor performance

Em regra, um sistema WEC apresenta cinco sistemas principais:

- Corpo oscilante (flutuador, bóia, / superfície de pressão e outros corpos móveis)
- Estruturas (estruturas flutuantes / fixas, pontões)
- PTO (conversores de energia; turbina de ar, turbina hidráulica, geradores magnéticos diretos, outros tipos inovadores)
- Unidades de transmissão de energia (subestação offshore, subestação onshore, transformadores AC, banco de compensação reativa, cabos submarinos AC)
- Unidades de segurança e sobrevivência (tanques de lastro, linhas de ancoragem)

Dando um exemplo em específico de processo de manutenção preventiva para cada subsistema utilizado no *Waverider* referido no capítulo 2 como sistema WEC de sistema PTO hidráulico multipontual [33]:

- Sistema de amarração - horário regular: a cada três meses ou após cada tempestade ou evento climático severo;
- Treliça, pontões, mecanismo e dispositivos eletrônicos - monitorização contínua (via vigilância por vídeo), inspeções regulares no local de barco, pesquisa e desenvolvimento para três meses a partir da implantação nove meses após a implantação;
- Luzes marinhas e de segurança - monitorização contínuo (via vídeo-vigilância). Inspeção in situ 3 e 9 meses após a implantação;
- Condições climáticas - monitorização contínua (via amostragem de vídeo), amostragem aleatória semanal;
- Lixo - monitorização contínua e remoção conforme necessário.



### 3.3 Sistema de tolerância à falha

O sistema de tolerância à falha (*fault tolerant system* – FTS) fundamenta-se na tentativa de combater as consequências de avarias e falhas, de modo a que todo o sistema permaneça funcional. As etapas iniciais de verificação da falha são nomeadamente a detecção (*fault detect*- FD) e o isolamento (*fault isolation*- FI) (*fault isolation diagnosis* – FID), na altura em que é feito o diagnóstico (*diagnosis*) onde é determinada a gravidade da falha segundo a monitorização (*monitoring*). Posteriormente é feita a recuperação ou reconfiguração (*fault recovery* - FR) que indica qual a abordagem e qual o tratamento da falha. A terminologia usada nas áreas de fiabilidade, segurança e sistema de tolerância à falha pode ter abordagens diferentes. Segundo comité técnico (*International Federation of Automatic Control* - IFAC – SAFEPROCESS *Tecnical comitee*), é importante que o projeto englobe termos que desenvolvam e inovem o produto.

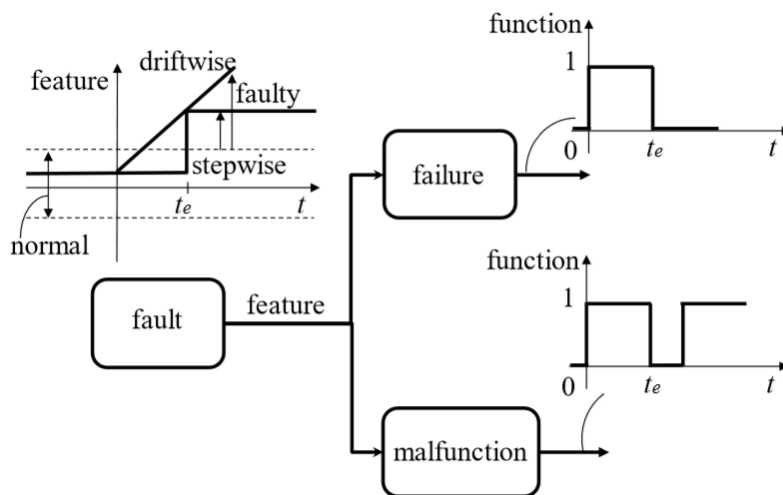


Figura 3.5 - Relação entre falhas, avarias e mau funcionamento [69]

O **mau funcionamento** (*malfunction*) é uma irregularidade intermitente no cumprimento da função desejada do sistema. A **falha** (*fault*) é um desvio não permitido de pelo menos a propriedade do sistema da condição padrão aceitável, usual. Uma falha pode iniciar uma falha ou um mau funcionamento e eles podem se desenvolver abruptamente (*stepwise*) ou incipientemente (*driftwise*), como pode ser visto na Figura 3.5<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Uma outra abordagem sobre falha, norma Portuguesa NP EN: 13306:2007, falha consiste na “cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida”.

Uma **avaria** (*failure*) é uma interrupção permanente da capacidade de um sistema de executar uma função requerida sob condições de operação especificadas e resulta de uma ou mais falhas. A taxa de avarias descrita por:

$$\lambda(t) = \frac{\text{número de avarias}}{\text{intervalo de tempo}} \quad (3.7)$$

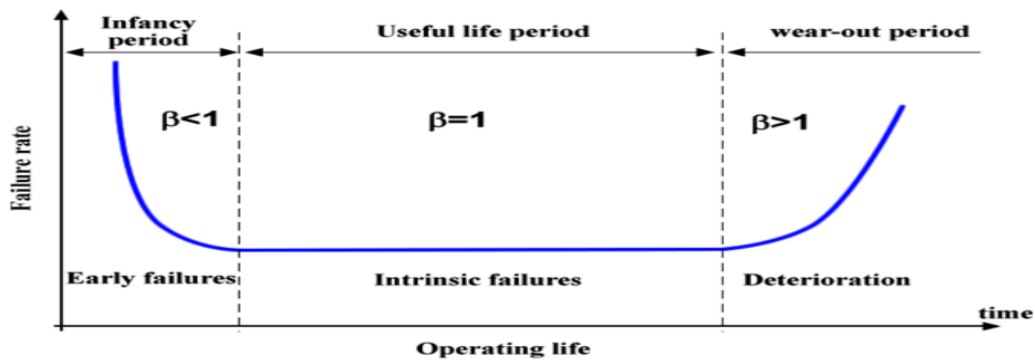


Figura 3.6 - Ciclos de vida útil de um bem Vs taxa de avarias [69]

A **taxa de avarias** (*failure rate*) é o rácio de número de avarias durante um tempo determinado. Este rácio é descrito ao longo do ciclo de vida de um bem e divide-se em três fases: a fase infantil, a fase de vida útil e a fase de deterioração. A fase infantil ( $\beta < 1$ ) é a primeira fase e está associada a falhas na fase infantil de projeto e as falhas não detetadas em protótipos. Consequentemente, na fase de vida útil ( $\beta = 1$ ) encontra-se todas as falhas e avarias que pretendemos analisar. Por último, na fase da deterioração ( $\beta > 1$ ) relaciona-se com o desgaste, com a fadiga ou com falhas exponenciais nos quais só ganham relevo no final do ciclo de vida.

O ciclo de vida baseia-se na distribuição de Weibull e sustenta-se em três parâmetros a seguir enunciados:

Parâmetro de forma –  $\beta$

Parâmetro de escala –  $\eta$

Parâmetro de posição –  $\theta$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\theta}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\theta}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.8)$$

Admitimos que a posição inicial é igual a zero, a probabilidade de falha resulta da seguinte fórmula bi-paramétrica:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.9)$$

Considerando que o equipamento se encontra em fase de vida útil deduz-se que o parâmetro de forma é igual a 1 o que transforma a equação acima na distribuição de Weibull mono-paramétrica:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \cdot e^{-\frac{t}{\eta}} \equiv f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.10)$$

Esta distribuição é análoga da distribuição exponencial negativa. A taxa de avarias (*failure rate* -  $\lambda$ ) comporta-se como uma constante no tempo em fase de vida útil então podemos assumir que é o inverso de um tempo de avarias por unidade de tempo:

:

$$\lambda = 1/\eta = 1/\text{MTBF} \quad (3.11)$$

Este intervalo de tempo pode ser anual, diário ou mesmo de horas dependendo da componente a analisar. Como vimos no gráfico da taxa de avarias ao longo do tempo, este valor é constante na vida útil. De forma a ajustar a taxa de avarias a outras fases de vida englobando a fadiga, a corrosão e o desgaste são necessários fatores de ajuste [69]. Seria ideal estimar os restantes parâmetros com mais dados referentes às falhas dos componentes. Porém, a distribuição da taxa de avarias (*probabilistic failure rate*) é constante no tempo e são esses valores estimados que servem de apoio na análise de fiabilidade do sistema.

**Fiabilidade** (*reliability* – R) é descrita em função da taxa de avarias:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.12)$$

Para considerar o componente com taxa de avarias constante no tempo é importante recorrer aos fatores de ajuste multiplicando as constantes pela taxa de avarias do componente. Todos os factores estão destacados em manual de referência - *Aramis appendix 7 Du Pont's Process Safety Management Reference Manual*. O principal fator destacado é o factor modo de falha ( $\pi_{FM}$ ).

Tabela 3.2 - Fator modo de falha [71]

Casos	Instrumentos	Válvulas
Fatores de processos médios		
Corrosão	1.07	1.14
Erosão	1.14	1.28
Incrustação e Entupimento	1.07	1.11
Fluxo Pulsante	1.14	1.07
Temperaturas Extremas	1.07	1.07
Fatores de ambientes externos		
Vibração	1.42	1.21
Atmosfera corrosiva	1.21	1.21
Atmosfera contaminada	1.07	1.07
Alta temperatura e humidade	1.07	1.07
Fatores locais		
Dano Mecânico	1.07	1.07
Não acesso à inspeção	1.07	1.07

Os manuais militares norte-americanos constituem uma abordagem menos genérica Mil-Hdbk-217F, 1995, 5.1.1-3 [70] separando os diferentes ambientes em níveis de factor ambiental diferentes. O fator impacto ambiental ( $\pi_e$ ):

Tabela 3.3 - Factor ambiental [71]

Ambiente	Símbolo	Fator	Descrição
Terreno, benigno	$tt_B$	0.38	Ambiente de laboratório acessível.
Terreno, fixo	$tt_F$	2.5	Condições não ideais
Terreno, móvel	$tt_M$	4.2	Equipamento instalado em veículos
Naval, protegido	$N_S$	4.0	Protegido, abaixo das condições do convés, protegido.
Naval, não protegido	$N_U$	5.7	Equipamentos desprotegidos, embarcados, clima exposto
Naval, submarino, não protegido	$N_{UU}$	6.3	Equipamento imerso em água salgada.
Naval, submarino	$N_{SB}$	4.0	Equipamento instalado em submarinos

Porém em fase de projecto é necessário considerar cenários mais agressivos para a presente tecnologia ajustando o factor ambiental multiplicando por uma constante que faça essa conversão. De acordo com a tabela 3.4:

Tabela 3.4 - Ajuste de fator ambiental [71]

Ajuste de Fator Ambiental	$tt_B$	$tt_F$	$tt_M$	$N_S$	$N_U$	$N_{UU}$	$N_{SB}$
$tt_B$	1.00	0.15	0.09	0.10	0.07	0.06	0.10
$tt_F$	6.58	1.00	0.60	0.63	0.44	0.40	0.63
$tt_M$	11.05	1.68	1.00	1.05	0.74	0.67	1.05
$N_S$	10.53	1.60	0.95	1.00	0.70	0.63	1.00
$N_U$	15.00	2.28	1.36	1.43	1.00	0.90	1.43
$N_{UU}$	16.58	2.52	1.50	1.58	1.11	1.00	1.58
$N_{SB}$	10.53	1.60	0.95	1.00	0.70	0.63	1.00

O fator capacidade ( $\pi_c$ ) é uma constante que associa o número de elementos em *standby* preparados para entrarem em funcionamento quando os componentes em linha não cumprem os requisitos para os quais são determinados. Existem outros fatores que não foram considerados nesta dissertação como temperatura, alimentação elétrica, qualidade dos bens quando instalados no sistema. Em relação à fiabilidade da PTO, várias redundâncias são aparentes na configuração *Pelamis* [71]:

- Três módulos de conversão de energia operam independentemente
- Dois geradores com potência de 125 kW cada estão instalados em cada um dos três módulos de potência.
- Dois sistemas hidráulicos independentes, com um eixo de elevação / oscilação cada

As influencias ambientais dividem-se em 4 grupos [72], apresentados na tabela seguinte.

Tabela 3.5 - Influências ambientais e falhas no mecanismo

Estrutura	Desgaste	Elétrico	Influências ambientais
<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ falha de projeto</li> <li>✗ dano externo</li> <li>✗ defeito de instalação</li> <li>✗ falha de manutenção</li> <li>✗ defeito de fabricação</li> <li>✗ sobrecarga mecânica</li> <li>✗ sobrecarga mecânica – colisão/ventos/ondas</li> <li>✗ presença de detritos/encrustação marinha</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ corrosão</li> <li>✗ desgaste excessivo da escova</li> <li>✗ fadiga</li> <li>✗ punção de tubo</li> <li>✗ fadiga de vibração</li> <li>✗ superaquecimento</li> <li>✗ insuficiente lubrificação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ erro de calibração</li> <li>✗ falha na conexão</li> <li>✗ sobrecarga elétrica</li> <li>✗ curto elétrico</li> <li>✗ falha de isolamento</li> <li>✗ relâmpago</li> <li>✗ perda de entrada de energia</li> <li>✗ condução de detritos</li> <li>✗ falha de projeto de software</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ pressão externa da água</li> <li>✗ atmosferas poluídas e salgadas</li> <li>✗ variações da temperatura</li> <li>✗ ciclos movimento e acelerações</li> <li>✗ não ser acessível</li> <li>✗ fatores humanos</li> <li>✗ colisão</li> <li>✗ presença de detritos</li> <li>✗ relâmpago.</li> </ul>

O exemplo *Wavestar* [73] , lista de falhas registadas foram:

- ✗ Flutuadores
- ✗ Rolamentos
- ✗ Clima
- ✗ Componente elétrico
- ✗ Falta de aperto entre juntas aparafusadas
- ✗ Falha no sensor de ondas ultrassónicas
- ✗ Deslizamento de base baseada em gravidade
- ✗ Operação normal - flutuante fora da água durante a tempestade
- ✗ Perda total de eletricidade - conexão de eletricidade danificada
- ✗ O gerador da matriz falha
- ✗ Falha no sistema de elevação do flutuador
- ✗ Falha da bomba auxiliar ou sua válvula e falha do motor (gerador) e/ou da bomba (turbina).
- ✗ Falha nos rolamentos

- × Medições de estado de onda, ou seja, o a amplitude da onda não estar de acordo com amplitude do cilindro pneumático
- × Sensor de segurança e sensor ultrassónico danificado
- × Falha no sistema de controlo
- × Falha no software do sistema de controlo
- × Fadiga
- × Cargas extremas (onda) - operação normal ou estacionado
- × Instalação de transporte
- × Má standardização e margem de erros demasiado justa.

Os **modos de falhas e análise dos efeitos** (*failure mode and effects analysis* - FMEA) é um estudo contínuo e organizado das falhas que possivelmente poderão ocorrer em qualquer parte do sistema para determinar o efeito e causa provável de cada uma sobre todas as outras peças com objetivo de desenvolver e inovar processos e produtos.

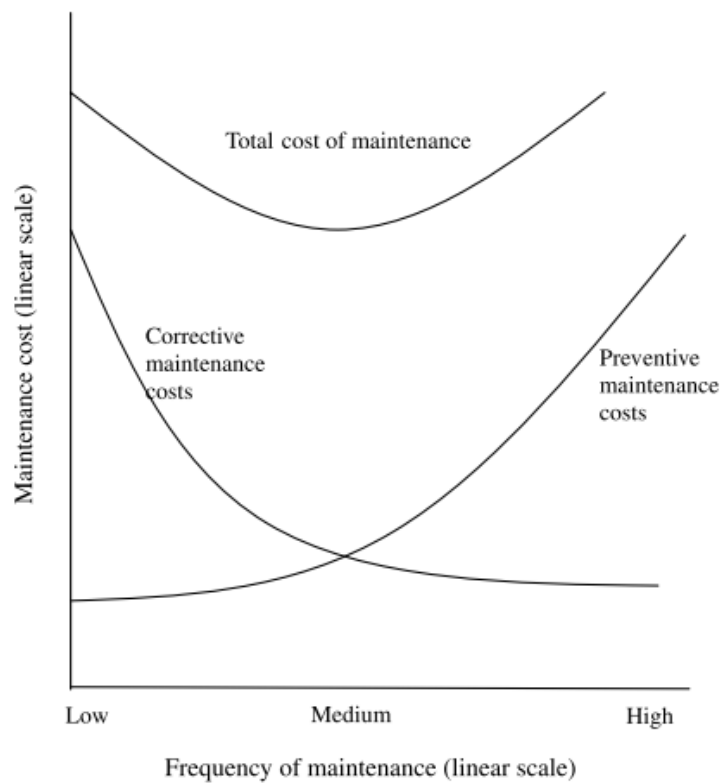
A **análise de modos de falhas, efeitos e criticidade** (*failure mode, effects, and criticality analysis*- FMECA) é o conjunto dos modos de falhas e análise dos efeitos acrescida da análise dos componentes críticos, que é usada para analisar a probabilidade de modos de falha contra a gravidade das consequências.

A **análise de causa principal** (*root cause analysis*- RCA) é um método de solução de problemas utilizado para identificar as causas-raiz de falhas. “5 whys” permite ir ao fundo da razão de forma iterativa.

A **análise de causa-raiz da falha** (*root cause failure analysis*- RCFA) idêntico ao RCA, mas destina-se apenas a causas de falhas existentes nos bens.

Os sistemas redundantes são colocados paralelamente aos componentes em funcionamento, ou seja, equipamento ou componente igual ao que está em série capaz de cumprir as mesmas funções. O componente em reserva só é ativado quando o equipamento principal se encontra com mau funcionamento, avaria ou falha. Este é acionado e controlado por sensores ou portas lógicas no UPS correspondente.

Como se ilustra na figura 3.7 [74], o número de falhas tem tendência a aumentar linearmente ao longo do tempo. O custo de manutenção descreve-se segundo uma distribuição exponencial negativa inversamente ao custo de reparação. Os conceitos do ciclo de vida de um bem relacionam-se com os tipos de manutenção inerentes. A manutenção preventiva é sugerida para os casos de vida infantil, a manutenção reactiva/correctiva em caso de desgaste no fim de vida e finalmente a manutenção inteligente na fase de vida útil. Esta abordagem inovadora destaca ferramentas de reparação e melhoria do estado do componente sem interrupção do seu funcionamento com conhecimentos analíticos avançados colocando as organizações da excelência e da liderança pelos custos.



*Figura 3.7 - Custos da manutenção [74]*



### 3.4 Sistema de isolamento e detecção da falha

A tolerância a falhas é feita através de controlo de sistemas, monitorização e sensores que parametrizam variáveis importantes para a performance do dispositivo. Através da monitorização da condição poder-se-á assegurar custos menores e manutenções mais eficazes bem como o controlo mais rigoroso das condições de fadiga e carga extrema prever o estado dos componentes através do prognóstico dos bancos de dados e estabelecer modelos de previsão [75].

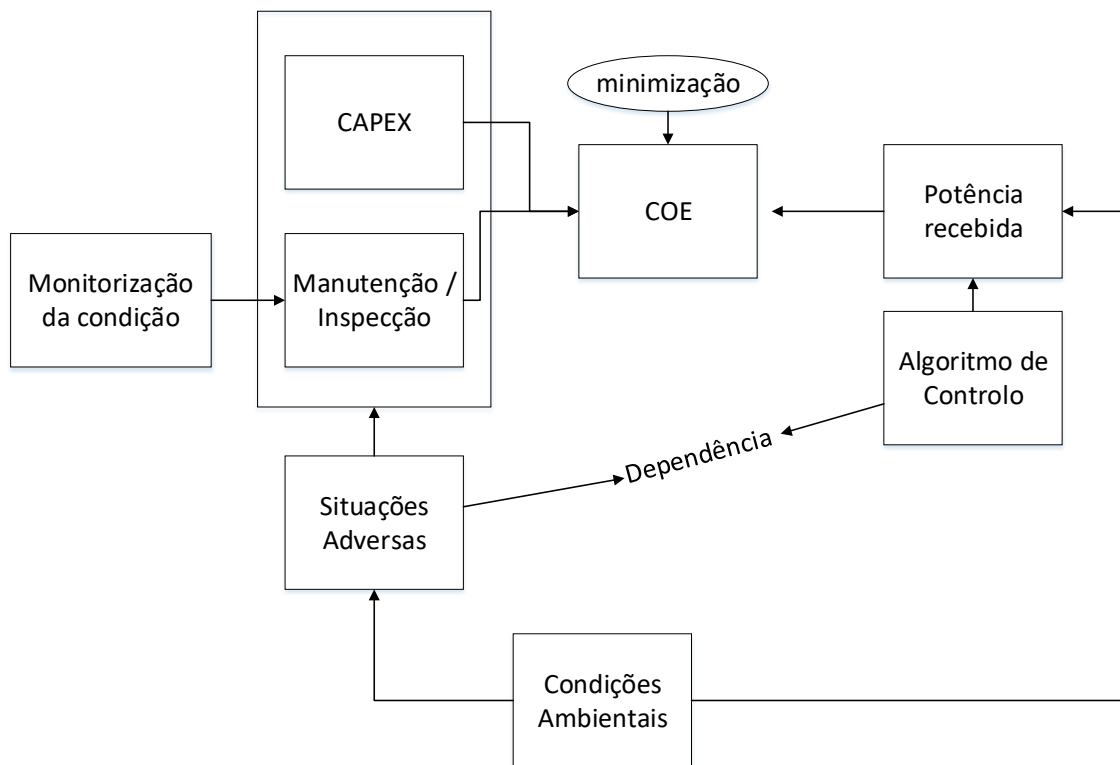


Figura 3.8 - Relações entre monitorização e controlo [76]

Contudo as falhas destes sensores podem levar a aprovisionamento ou agravamento do estado crítico caso deixem de avisar o estado dos componentes e consoante os casos, tornam-se necessárias inspeções periódicas para salvaguardar imprevistos dessa natureza. Os parâmetros nos diversos estágios são:

2. Recurso marítimo
3. Estrutura (amarração, bóia e vedações)
4. Sistema de conversão de Potência (PTO)
5. Sistema elétrico (Gerador, Conversor e Transmissão)

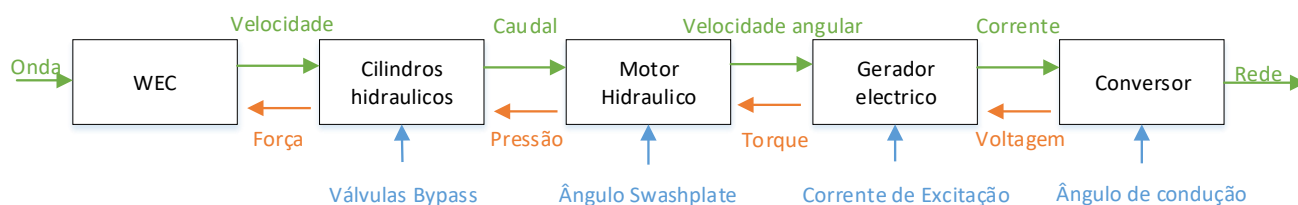


Figura 3.9 - Parâmetros entre estágios do sistema

Nos recursos marítimos, os primeiros parâmetros a monitorizar são [76]: a posição, através de um sistema de coordenadas (*global positioning system* - GPS) onde se mede a latitude, longitude e altitude; a altura e o período das ondas e existência de correntes provocadas pelos ventos (velocidade e direção) através do calculo movimento retilíneo uniforme (*uniform rectilinear movement* – MRU). Em Portugal, todas estas informações são registadas nos Faróis ou em sites como o *WindFinder* (<https://pt.windfinder.com>).

A forma de obtenção pode ser via [76]: Sensores, câmaras de vídeos ou via satélite.

Sensores e transdutores de monitorização da deformação	Vantagens	Desvantagens
Inclinómetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Excelente precisão,</li> <li>✓ Perto do tempo real no feedback</li> <li>✓ Baixo custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ O design de matriz dos medidores de inclinação deve ser considerado com cuidado</li> <li>✗ Alguns tipos de sensores de inclinação sofrem uma variação que causa um erro acumulado</li> </ul>
GPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Deformação em monitores em 3 dimensões</li> <li>✓ Boa robustez</li> <li>✓ Dados de variáveis contínuos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Apenas num ponto único.</li> <li>✗ Necessita de bom clima.</li> <li>✗ Custo elevado</li> </ul>
InSAR	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cobre áreas bastante elevadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Precisão limitada dependente das condições do projeto.</li> <li>✗ Custo elevado</li> </ul>

Através de sensores ligados ao anemómetro é possível ler a velocidade e direção dos fluidos quer seja ar ou água. Os tipos ligados de anemómetros utilizados para o vento são [76]:

<b>Tipo</b>	<b>Funcionamento</b>	<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	<b>Precisão (%)</b>	<b>Observação</b>
Ventoinha	Velocidade rotativa	Maior ou igual 3	1,5	Baixo custo e pouca manutenção
Fio Quente	Corrente e resistência	1 a 9	5	Baixa precisão e precisa de ajuste de temperatura
Ultrassónica	Frequência do Vortex	1 a 25	1,5	Alta fiabilidade e estabilidade
Hall effect	Diferença de Potencial	0 a 20	1,1	Alta precisão e alto range

No subsistema estrutural monitoriza-se parâmetros como a corrosão, fadiga e pressão com principal destaque nas amarrações caso existam [77]. Os intervenientes deste diagnóstico são:

- ✓ *Input Controller* – posição, direção pontos de ajustes velocidades estimadas e taxa de mudança de sentido.
- ✓ *Observer* – estima velocidades e taxa de conversão e filtra a informação do controlo do input.
- ✓ *Sensors selects* – seleciona o conjunto de sinais saudáveis do sensor.
- ✓ *Setpoint generator* – calcula o ponto de equilíbrio dos sensores.
- ✓ *Residual generator* – calcula o vetor residual através do Set-point Generator
- ✓ *Change dectetor* – formula uma hipótese de testes de performance dos componentes de forma a estarem num intervalo de máxima utilização
- ✓ *FTC supervisor* – bloqueia e mantém a supervisão dos sensores e atuadores.
- ✓ *Remedial actions funcions block* – a manutenção é executada. A falha na linha da amarração é tipicamente na mudança do Set-point. Através de ajustes de hardware ou software.

Os três tipos de sensores mais utilizados para a medição destes parâmetros são [115]:

Tipo	Funcionamento	Medidas	Resolução	Obs.
Wave Buoy	Baseado no MRU ou GPS	Altura (-20m a 20 m) Período (1,5s a 33s) Direção 0-360°	0,01m; 0,1s; 1°	Alto custo, Boa precisão alta manutenção
Radar X-band	Opera com pequenas pulsações e medidas do estado do mar digitalizando as imagens	Altura (0,5m a 20 m) Período (3,5s a 40s) Direção 0-360°	0,1m; 0,1s; 1°	Alta fiabilidade e estabilidade
Sensor Airgap	Emite microondas e recebe ecos da superfície do mar	Altura (0-60 m) Período (0-20s)	0,01m; 0,1s	Montado e fixado a estrutura e trabalho com MRU

Na parte do **PTO** é importante analisar [78]:

- ✓ Temperatura – através de diversos transdutores nomeadamente: termostato, termístor, termopar ou pilha termoelétrica. Estes transdutores são colocados em: caixa de velocidades, óleo hidráulico, rolamento da caixa de velocidades e rolamento do gerador;
- ✓ Força – através de sensores de torque pode-se monitorizar a velocidade angular ou o binário nos seguintes pontos: tensão da torre, torque do eixo, vibração da caixa de engrenagens e momento de flexão da raiz da lâmina[79];
- ✓ Posição – potenciómetro, LVDT, rotary encoder para calcular a velocidade obtida no gerador, no motor, ou colocado nas pás das turbinas para indicar a velocidade do vento;
- ✓ Fluidos – importante ter em conta parâmetros de pressão, caudal e viscosidade. Os fluidos incluídos nos sistemas de refrigeração ou no ciclo pneumático/hidráulico;
- ✓ Ótica – fotodíodo, fototransistor, fotodetector, infravermelho, fibra ótica;
- ✓ Presença – analisa a proximidade ou a distância entre dois pontos como o motor *swasplate*;
- ✓ Ambiente – temperatura, humidade, fumo, gelo e luz;
- ✓ Características elétricas como a corrente ou voltagem;
- ✓ Pressão.

Os problemas possíveis nos sensores incluem flutuação dos sinais, resposta temporal lenta, polarização ou zona morta. Com o sistema de controlo em tempo real, as falhas nos sensores podem originar condições adversas, dando especial importância à existência de auditorias e inspeções periódicas.

No caso das turbinas pneumáticas, os parâmetros controlados são [80] vibração (*gearbox, bearing, shaft*) pela norma ISO 10816 de elevado custo e intrusivo mas fiável; torque (*rotor, gear*) tirado no carregamento do rotor; análise do óleo (*bearing*); temperatura (*bearing*) pela norma IEEE 841 tem como desvantagem não se conseguir analisar de onde vem a falha; emissão acústica (*bearing, gear*) fácil de analisar e bom para baixas velocidades e tem um alto sampling rate requerido; voltagem e corrente (*bearing, gear*) não precisa de sensor, baixo custo e fácil implementação. Para estes os sensores específicos para sistema WEC são:

Medidas	Sensores específicos	Propriedades
Posição, deslocamentos com 6 graus de liberdades	Sistema de Navegação Inerte (INS) DGPS / RTK	Forte anti-interferencia. Alta dinâmica de precisão, precisão no erro acumulativo; Precisão a nível das centésimas, suscetível as interferências e equipado na estação base.
Posição linear, ângulo e curvatura <i>Yaw</i> e inclinação estática	Acelerómetro, inclinómetro, compasso, sensor angular,	baseado na 2ª lei de newton, baseado em INS; compasso magnético e elétrico conhecido como giroscópio.
Rolo, passo, yaw and peso	Motion reference unit (MRU)	pequeno tamanho, peso luz e baixo poder de consumption

Para cada tipo de PTO é associado um controlo específico comum para registar e maximizar o rendimento das tecnologias no PTO de turbinas, regista-se:

- Pico da onda (altura significativa = 0.28 m e período da onda 6.2 s)
- Velocidade de escoamento que atravessa a turbina de ar
- A velocidade angular que as pás das turbinas apresentam

Nos sistemas PTO hidráulico em offshore, registam-se os seguintes aspetos:

- Latching/delatching Control
- Fase em que se situa a bóia fase ao comprimento da onda do mar. para que o pico máximo corresponda ao pico máximo da onda e vice-versa.
- Pressão dentro dos tubos

Por fim os sistemas de PTO de Gerador linear, regista-se apenas parametros relacionados com a electricidade nomeadamente corrente e tensão.

Na restante **transmissão elétrica** podemos assegurar os 3 tipos de PTO referindo [81]

- Motor - caso seja desacoplado do movimento do dispositivo por meio de uma PTO hidráulica a variabilidade do sinal e os transientes podem ser menos fortes do que as turbinas. Se for desacoplado por acionamento mecânico a variabilidade da carga pode ter características únicas e estudos muito específicos.

- Gerador Linear – a dificuldade de monitorizar nestes casos são as quantidades elétricas, temperatura do gerador, nível da água no interior do gerador, posição do transdutor, forças experimentadas nos extremos da grelha no movimento do tradutor alternativo.

Toda esta informação deve chegar a um centro onshore. Devem ser estabelecidos limites para todas as variáveis parametrizadas de forma a facilitar o processo. De forma a processar a informação é importante existir um computador que registre todos os valores como por exemplo o que o WEC *onshore Limpet* dispõe [82].

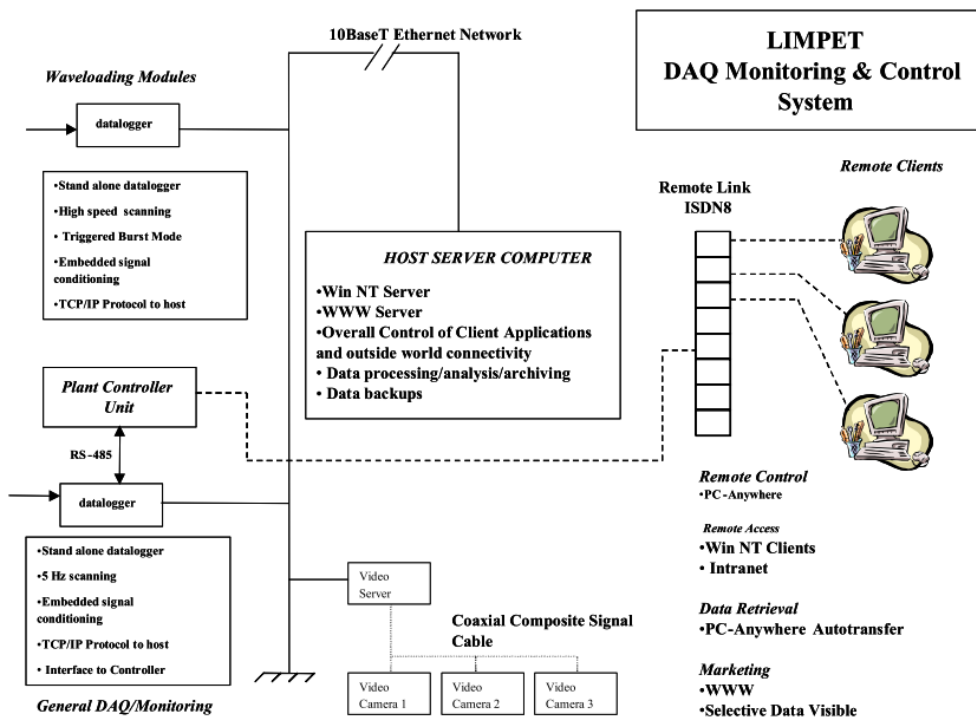


Figura 3.10 - Monitorização do LIMPET [82]

Com o desvio dos parâmetros do range estabelecido deve ser implementado sistemas de controlo como os indicados na tabela seguinte:

*Tabela 3.6 - Tipos de Controlo face ao tipo de tecnologia*

<b>Controlo</b>	<b>Referências</b>
<b>Terminator</b>	
Peak - power control	[68][83]
Air valve - flow control	[84][85][86][87]
Hydrodynamic / Rotational Speed Control	[3][88][26]
Latching Control	[89] [90]
Fuzzy logic control	[91][92][93][94][95][95][96]
Active Power Feed-Forward (APF) – (wavedragon)	[81]
Direct Power and Torque Space Vector Modulation (DPTC-SVM) – wavedragon	[81]
n Grid Side Converter with Pulse Width Modulation - wavedragon	[81]
Direct Power Control with Space Vector Modulation (DPC-SVM) – wavedragon	[81]
<b>Point Absorbers e Attenuators</b>	
Latching control	[97][98]
Latching–Declutching Control	[99][100]
Reactive phase control	[101]
Global control	[102][103][104]
Independent control	[102]
Projected gradient method	[105]
Feedback linear control	[106][107]
Phase control	[108]
Stiffness and damping control	[109][110]
Optimal Active Control	[111][79]
Doppler Bandwidth	[112]
Linear Viscid Model Predictive Control	[113]
Nonlinear passive control para ondas irregulares	[114][115][116]
Two voltage source converters (VSCs) / ressonante Circuit - AWS	[117]
CFD to extreme wave loading	[118]
Permanent Magnet Linear Generator	[119][120]
Magnetic Lead Screw	[121]
Delay or Removal of Aneurysm Formation - AWS	[122]
Linear generators for direct-drive wave energy conversion - AWS	[123]
Hydraulic Parallel Circuit (HPC) – wavebob	[124]
Position-mooring	[77]
Multi-Body Point Absorber System Without a Mooring	[125]
Vector control of PADA system (phase 90° ahead of a flux inside generator)	[81]
Reynolds-Averaged Navier–Stokes simulation	[126]
Locked FPA modeling	[126]
two-phase VOF model	[127]
Wave pressure acting seawave slot-cone generator	[128]

### 3.5 Custos e níveis de manutenção

Os níveis e custos de operação e manutenção (*operation and maintenance* - O&M) aumentam substancialmente com a distância a costa, ou seja, quanto mais distante for a tecnologia do continente mais dificuldades de manutenção e maiores custos estão envolvidos. Nas tecnologias *offshore* não só é somado o transporte da equipa com competências transversais dentro do seu horário de funcionamento como toda a tecnologia a empregar, como por exemplo, o equipamento de substituição e de monitorização, entre outros.

O modelo de custo para conversão de energia [129] tem como base os limites da confiabilidade impostos nas alterações climáticas com as características electro-mecânicas das tecnologias projetadas dos modelos físicos e matemáticos. Este sistema é aprimorado pelos custos investimentos, de instalação, de transmissão, de operação e manutenção que alteram, por sua vez, os de custos de produção de energia.

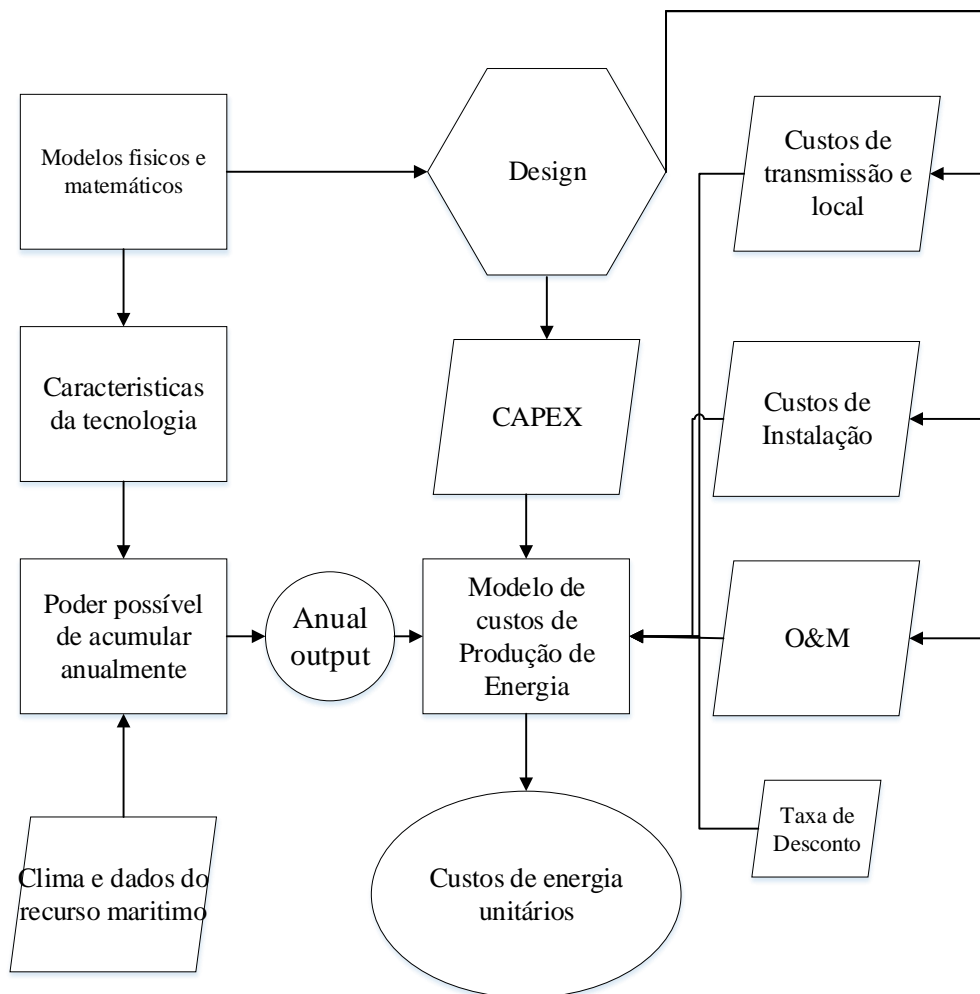


Figura 3.11 - Modelo de custos O&M [129]



A norma Portuguesa 13306 (traduzida da norma inglesa). O escalão de manutenção é organizado consoante a posição no seio de uma organização, onde os diversos níveis especificados de manutenção são executados sobre um bem. Nesta norma destacam-se os seguintes aspectos:

1. Exemplos de escalões de manutenção no local, na oficina de reparação ou no fabricante.
2. Caracterizam-se pela competência do pessoal, dos meios disponíveis e da localização.
3. Os níveis de manutenção são caracterizados pela complexidade das tarefas de manutenção.

A norma Francesa (AFNOR). NF EN 13306 X 60-319 e norma FD X 60-000 (1994) separa os níveis da manutenção em 5 estágios:

1. Afições simples previstas pelo construtor sem desmontagem do equipamento ou substituição de elementos acessíveis executado pelo operador de máquina, com toda a segurança.
2. Reparações através de substituição de elementos *standard* previstos para este efeito ou operações menores de manutenção preventiva (rondas) executado por técnico habilitado ou em algumas situações o operador.
3. Identificação e diagnóstico de avarias, reparação por substituição de componentes funcionais, reparações mecânicas menores executadas por técnico especializado no local ou equipa de manutenção.
4. Trabalhos importantes de manutenção corretiva ou preventiva executado por equipa de manutenção.
5. Trabalhos de renovação, de construção ou reparações importantes numa oficina central ou por subcontratação executado por equipa polivalente de manutenção.

Contudo estes níveis de manutenção não englobam os fatores económicos associados. De forma a criar a matriz de comparação atendendo às normas francesas, podemos dividir em três níveis qualitativos:

Alto [5]: Esses dispositivos exigem manutenção regular com curtos intervalos de tempo por motivos variados. Normalmente no caso de dificuldade de manutibilidade deve-se os sistemas WEC serem complexos. Presença de peças únicas e o acesso ser difícil torna a manutenção elevada. Como a dificuldade da manutenção e custo são elevados.

Médio [3-4]: Manutenção periódica. Também será moderadamente fácil de atuar.

Baixa [1-2]: Manutenção regular mais espaçada. Acesso fácil as peças críticas normalmente peças normalizadas. Faz com que o custo de manutenção seja bastante minimizado.

High	[46] Wavemaster	[130] [131] Sparbuoy [5] Centipod [5] Mobile wave energy harvester [5] OMI Wavepump	
Medium	[44] Sakata [132] Salter Duck [46] Waverider [133] Waveblanket [134] Poseidon [135][136] [137] Oyster [25] Waveroller [4] Setellen WEC [47] Oceanstar [138] Bombora [139] [81] Wavedragon [140] WET EnGen [27] Langlee WP [11] Biowave	[141] Aws-iii [142] Sloped buoy [143] Searaser [16] Seabased AB [49] Ceto [144] C-Wave [46] Leancon [56] [81] [145] Wavebob [16] Archimeds WS [133] Sri international [46] Pelagic Power [46] Sync WavePower Resonator [107] Direct Energy Conversion Method (DECM) [5] wavepump [47] Seaheart [143] Searaser [146] Searay [47] IOWEP [147] gyrowavegen [63] Seatricity [147] danish wave energy power float pump [47] hyerbaric coppe ufrje device [133] Wavesurf [133] YOG	[133] Aquagen Surge Drive [47] EGWAP [148] Cockrell Raft
Low	[45] [149] Mighty Whale [11] Oceanlinx	[150] [151] Sperboy [46] SeaDog [152] [73] WaveStar [153] Aquaybuoy [154] [155] Powerbuoy [156] WAP and WWP [157] Waveberg [4] Wave-powered Difragma [158] SEAREV [90] Pneumatically Stabilized plantaform [96] Wave Rotor [62] WEGA [59] [159] PSFROG [53] IPS Buoy	[28][160][40] [81] [161] [144] [28] [139] Pelamis [162] Floating wave generator
	Terminator	Point Absorber	Attenuador

Tabela 3.7 – Custos e Níveis de Manutenção de tecnologias *offshore*

A tabela indica que existem vários fatores que determinam e avaliam a manutenção de cada tecnologia, nomeadamente:

- ✓ A **distância à costa** determina a dificuldade da manutenção. A tecnologia de rápido acesso ou próxima da costa tem a manutenção mais baixa.
- ✓ A **constituição do dispositivo** é um fator determinante pois caso a tecnologia tenha peças de fabrico difícil, únicas e não normalizadas, a sua manutenção requer mão-de-obra especializada e custos elevados. Caso a tecnologia dispuser de muitas partes móveis os custos serão menores.
- ✓ A **disposição face a linha do mar** é um fator a ter em atenção, pois se o dispositivo é submerso existem perigos de corrosão e desgaste muito mais acentuado. Neste caso para efeitos de manutenção, a tecnologia terá que ser retirada do mar para ser recuperada. Tudo isto constitui horas de trabalho da equipa bem como o ascensão da estrutura do sistema WEC que pode atingir os 250000 m<sup>3</sup> de volume de densidade elevada [47].

No exemplo do *Powerbuoy P50* os custos estimados para O&M estavam entre os valores 5-10 % e alcançaram os 273 % com os fatores: sistemas de freio, sistema de armazenamento de energia, parafuso de esfera e unidade de lubrificação de guia, unidade de lubrificação de vedação linear, sistema de arrefecimento [155].

O CAPEX e OPEX incluem tanto as peças de substituição, honorários dos engenheiros e técnicos presentes na formação do produto e a sua manutenção, transporte, instalação, remoção e intervenções extraordinárias.

Nos casos *offshore* a manutenção e transporte é feita através de um barco que tem custos associados. Por isso, é necessário um plano com tempo de chegada estimado, duração da manutenção transporte de equipamento necessário e de pessoas responsáveis para a tarefa exigida. Para termos uma noção dos valores praticados [163] o transporte do barco aproximam-se dos 5k £ de mobilização acrescidos de uma taxa diária de 4k £, além de 1k £ de combustível. Na parte da gestão de O&M engloba um salário anual de 45k £ com um gasto de amarrações de cerca de 60k (x2) £ com hidráulicos 90k (x3) £ na parte estrutural 90k (x3) £ parte elétrica 60k (x2) £ e extras que rondam os 10k £. Em Inglaterra, este valor em euros está sujeito a uma taxa de câmbio de 1 £=1.14 €.

O helicóptero é o último recurso devido ao acréscimo da dificuldade de acesso comparando com a via mais requerida, via barco.

Em terra a distribuição das tecnologias é igual à tabela anteriormente referida em offshore. Podemos verificar que existem as mesmas condições impostas nos sistemas *offshore*, não considerando neste caso a distância até à costa. Os indicadores de constituição do dispositivo e distância face a linha do mar são os mais considerados.

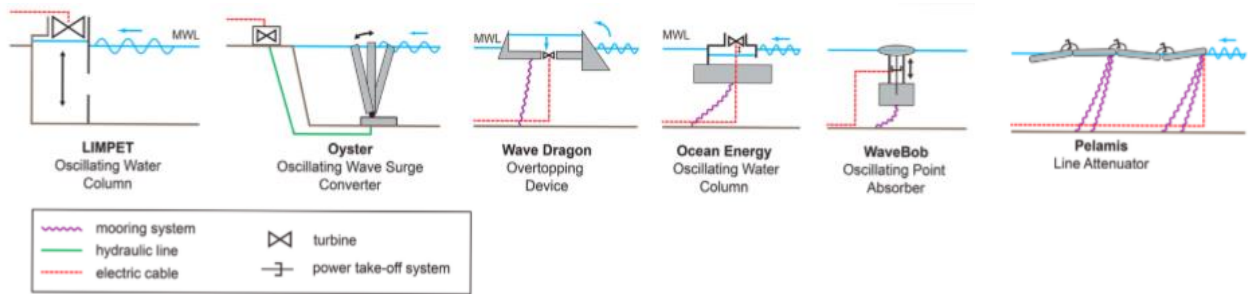
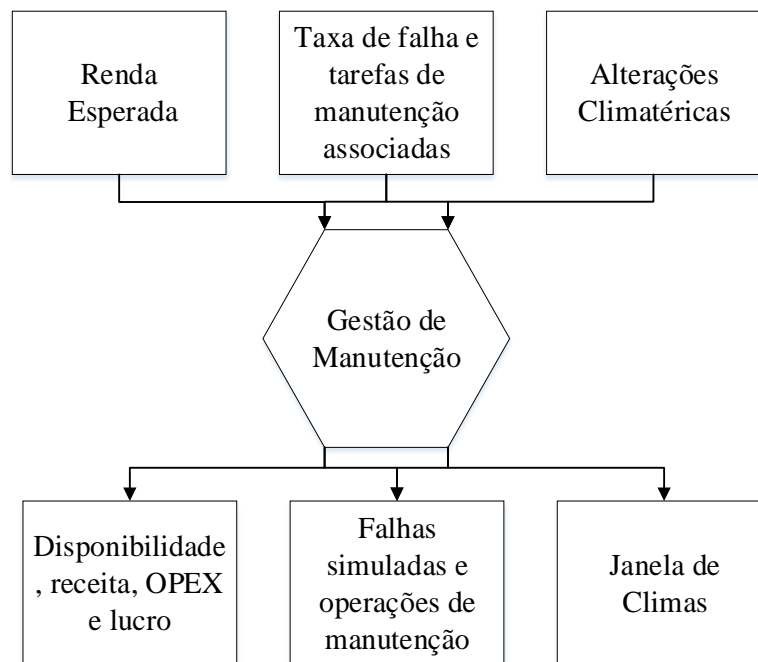


Figura 3.12 - Modelos dos sistemas WEC [163]

Tabela 3.8 - Custos e Níveis de manutenção on e nearshore

High	[47] Ovadia [164] Weptos	[163] Penguin	[165] Navatek [166] Nautilus
Medium	Tunneled WEC [31] Pico Power Plant [167] Vizhimjam OWC [128] Multisessionance OWC [30] Onshore Oscilating buoy [168]Sanze [47] Isle of Islay [31] Osprey [169]Pendulor [170] Hydroair [171] Drakoo-b [28]Waveplane [47] Waveturbine	[30] Burin WPP [130] FO3 [133] Hidroflot [46] Aegir Dynamo [30] Vert7 [30] OEMP [5] Triton [30] Motor Wave [30] Lever Operated pivoting Float [172] Wave Catcher [29] IWave [30] Oceantreader [13]Oceantec	[46] Wavemill [24] FLOW [30]Vigor [30] Anaconda WE [171] Dexa WEC [30] EB Front
Low	[173]Limpet [174] Sperboy [29] MRC1000 [175] SSGS [130] Tapchan [29] OWEL [30] OE buoy	[30] WEMachine [30] SDE – Sea waves power plant [176] Energen WG	[169]Mccabe Wave pump [30] Etymol
	Terminator	Point Absorber	Attenuador



*Figura 3.13 - Gestão da Manutenção*

As tecnologias são projectadas para fabricar uma porção energética fixa, por isso na maior parte dos casos não considerados ferramentas de manutenção e reabilitação para as mesmas. O exemplo deste tipo de acontecimentos é o PICO, que apenas em 2018 é que foi retirado do local com anos de inatividade com impacto ambiental e visual significativo. Para que tal não aconteça, é importante criar ferramentas de aumento de vida útil da tecnologia e do sistema WEC bem como auditorias e consultas para averiguar o estado.



---

## 4. Caso de Estudo

---

Muitos são os estudos que abordam a manutenção e a fiabilidade do PTO de turbina em casos *onshore*, mas em *offshore* são raros os estudos publicados. Tendo em conta este problema abordaremos um Sistema WEC com PTO Hidráulico de HPA com amarração multicantenária, com a metodologia descrita na secção 4.1. A análise deste sistema (secção 4.2) é feita pela divisão dos 4 subsistemas: Segurança e Capacidade de Sobrevivência (secção 4.2.1); Estrutura (secção 4.2.2) Power Take Off (secção 4.2.3) e Transmissão Elétrica (secção 4.2.4). Por fim é feita uma análise atendendo ao sistema WEC na sua totalidade (4.3).

### 4.1 Metodologia

O sistema de análise de risco (*system risk analysis system* -SYRAS) mostram que podemos separar as falhas de um sistema WEC com um sistema de conversão de potência hidráulico de absorção pontual *offshore* em 4 subsistemas [177]. Para cálculos de valores de fiabilidade foi usado um software da *Reliasoft*<sup>®</sup> chamado de *Blocksim*. Apesar do sistema estar em série e as falhas terem impacto na cadeia, consideramos para cálculos estatísticos as falhas são independentes entre si. As informações são demasiadas escassas onde estão estudadas apesar de algumas limitações sobre dispositivos *offshore*, mas tem características como tempo de reparação, fiabilidade em ambientes severos. É importante destacar as referências existentes colocando por ordem de importância as que são *offshore* e *expert* em prole dos protótipos e genéricos. Considerando as seguintes fontes bibliográficas para as taxas de avarias[178]:

- O.RE.DA (Offshore REliability DAta)
- Green & Bourne (1978)
- Smith (2005)
- SINTEF (1984 e 1997)
- YARD (1980)
- Van Bussel & Zaijjer (2001)

- FARADIP (2006). Failure rate data in perspective
- Klaassen & van Peppen (1989)
- Noble Denton (2006)
- RIAC (1995)
- AME (1992). Reliability and availability assessments of wave energy devices. Technical Report ETSU WV 1690 - P1, Advanced Mechanics & Engineering [AME], report for the Energy Technology Support Unit [ETSU]. 33, 105, 109, 112, 310

Para cada um dos componentes encontrados os valores estimados com os respectivos factores referidos na secção 3.4. Face a análise de literatura encontrada os valores escolhidos são:

*Tabela 4.1 - Taxa de avarias dos componentes*

	$\lambda$ (per annum)	$\pi$ total	$\pi_e$	$\pi_{FM}$	$\pi_M$	$\pi_r$	$\lambda$ total
Mooring	0,185	1	1	1	1	3	0,555
Hull	0,011	0,1	1	0,1	1	1	0,0011
Joints	0,65	0,5	0,5	1	1	1	0,325
Seals	0,0364	2	1	1	2	12	0,8736
Hydraulic Ram	0,087	2,8	1,4	2	1	1	0,2436
Manifold	0,002	2	1	2	1	1	0,004
High/Low pr. Accumulator	0,263	1,6	1,6	1	1	1	0,4208
Motor	0,107	1,6	1,6	1	1	1	0,1712
Generator	1,588	1	1	1	1	1	1,588
Busbar	0,004	2,3	2,3	1	1	1	0,0092
Transformer	0,053	1,489	1,489	1	1	1	0,078917
Circuit Breaker	0,184	1,4	1,4	1	1	1	0,2576
Umbilical Cable	0,037	1	1	1	1	1	0,037
Subsea Cable	0,15	0,6	1	1	0,6	1	0,09

De forma a controlar todos os elementos e subsistemas de forma mais concisa para além do gráfico fiabilidade em ordem ao tempo é calculado a fiabilidade no primeiro mês (730 horas), no sexto mês (4380 horas) e com um ano (8766 horas) de funcionamento. O tempo esperado de cada componente é dado com diferentes intervalos de confiança como 5% de fiabilidade, 10% de



fiabilidade definido em *BX life* e 100% de probabilidade de falha em *MeanLife* representando o MTTF. O *software Reliasoft*<sup>®</sup> utiliza alguns termos importantes de referenciar, nomeadamente o *Deauty Cicle* que representa a percentagem de tempo utilizada no ciclo que permite calcular a vida acelerada. Neste caso todos os componentes funcionam 24h por dia o ano inteiro.

De forma a isolar os componentes críticos recorreremos a análise de modo e efeitos de falha (*failure mode effects analysis* - FMEA) [179] é um estudo sistemático e estruturado que permite analisar o risco de forma qualitativa e colocar os componentes e sistemas por ordem de criticidade [180] .

Na análise FMEA, a ocorrência da falha é relacionada com a taxa de avarias. O procedimento comum é determinar o mínimo e máximo da taxa de avarias nos componentes da cadeia e fazer corresponder a escala predefinida. A severidade aborda o dano causado pela falha no componente como a reacção desta falha nos restantes componentes e no sistema em si. A detecção está relacionada com a facilidade e agilidade de localizar as falhas. Nesta análise é importante separar e categorizar todos os valores de 1-10. O risco é (*risk priority number* – RPN) é calculado pela multiplicação dos 3 componentes da análise FMEA: Ocorrência (O), Severidade (S)e Detecção (D) que se encontram na tabela 4.2, 4.3 e 4.4.

$$RPN = O \times S \times D \quad (4.1)$$

Tabela 4.2 - Niveis da Ocorrência

O	Nivel	Descrição	$\lambda$ (per annum)
1	Remota	Falhas quase inexistentes.	0,00000067
2	Baixa	Falhas escassas.	0,00000667
3		x	0,00006667
4	Moderada	Falhas ocasionais.	0,00050000
5		x	0,00050000
6		x	0,00250000
7	Alta	Falha repetida.	0,05000000
8		x	0,12500000
9	Muito alta	Falha quase invetável.	0,33333333
10		x	0,50000000

Tabela 4.3 - Níveis da Severidade

<b>S</b>	<b>Nível</b>	<b>Descrição</b>
1	Nenhuma	Sem efeito.
2	Muito menos	Defeito cosmético no acabamento, mau encaixe com agitar componentes que não estejam em conformidade com as especificações. Defeito percebido por discriminação via ocular à distância
3	Menos	Defeito cosmético no acabamento ou mau encaixe com agitar de componentes que não estejam em conformidade com as especificações. Defeito percebido via ocular próxima.
4	Muito baixa	Defeito cosmético no acabamento ou mau encaixe com agitar componentes que não estejam em conformidade com as especificações. Defeito notado via ocular pelo especialista.
5	Baixa	Componentes ativos ou de conveniência operáveis em nível reduzido de desempenho. Defeito notado via ocular pelo tecnico de manutenção
6	Moderada	compoentnes ativos ou de conveniência operáveis em nível reduzido de desempenho. Defeito notado via ocular pelo engenheiro
7	Alta	Componentes átivos, mas um nível reduzido de desempenho. Defeito analisado via sensor ou software.
8	Muito alta	componentes inátivos, com perda da função primária.
9	Perigosa com aviso	Classificação de gravidade muito alta quando um modo de falha potencial afeta a operação segura e/ou envolve o não cumprimento de regulamentações governamentais com aviso.
10	Perigosa sem aviso	Classificação de gravidade muito alta quando um modo de falha potencial afeta a operação segura e / ou envolve o não cumprimento de regulamentações governamentais sem aviso.

Tabela 4.4 - Níveis da Detecção

<b>D</b>	<b>Nível</b>	<b>Descrição</b>
1	Quase certa	O controle de projeto quase certamente detectará uma causa/mecanismo em potencial e um modo de falha subsequente.
2	Muito alta	Chance muito alta de o controle de projeto detectar uma causa/mecanismo ...
3	Alta	Alta chance de o controle ...
4	Relativamente alta	Relativamente alta chance...
5	Moderadamente alta	Chance moderada do controlo ...
6	Baixa	Pouca chance de o controlo ...
7	Muito baixa	Chance muito baixa ...
8	Remota	Chance remota ...
9	Muito remota	Chance muito remota ...
10	Impossível	o controle de projeto não irá e/ou não poderá detectar uma causa/mecanismo em potencial e um modo de falha subsequente; ou não há controle.

## 4.2 Análise de subsistemas

### 4.2.1 Subsistema de segurança e capacidade de sobrevivência

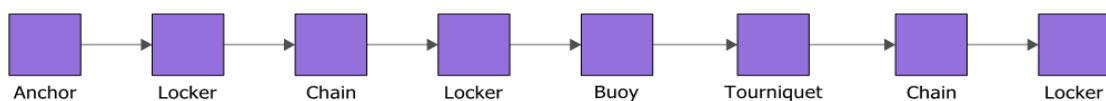
#### 4.2.1.1 Amarrações

As amarrações constituem a fixação do sistema WEC ao fundo do mar. Assumindo que o tipo de amarração para o estudo de fiabilidade é composto por uma ancora, um cadeado, corrente, a boia, um contrapeso com cadeado e um outro cadeado como mostram as figuras 4.1 pela análise do RS e 4.2 pelo modelo físico. Para restringir o movimento ao eixo da altura, coloca-se sistemas de amarração em triangulação, tal como o GPS. Geométricamente será necessário a intersecção de três linhas para fixar um ponto nas três coordenadas do espaço.

As falhas podem ser monitorizada através da localização do GPS, mas caso haja previsão atmosférica e marítima é necessário verificar o estado na seguinte intervenção da manutenção.

A taxa de avarias por ano é de 0,185, não é crítica normalmente são 3 elementos o tempo de recuperação 22 h e não é possível operar a noite e o tempo de aquisição 48 h [177]

Não existe sistema redundante. O controlo via videovigilância serve para antecipar possíveis falhas e consuate a base de dados [181] O sistema como um todo deve ser capaz de durar 30 anos ou mais, com substituição de componentes específicos em não menos que 5 anos [42] pelo estudo de diversos WECs [43]. Os efeitos destas falhas são, em pior cenário a destruição e maior desgaste do WEC, ou o rendimento enenergético diminuir drasticamente. Já existem WECs absorvsosres multipontuais sem amarrações [125].



*Figura 4.1 - RBD a nível componente da amarração [RS]*

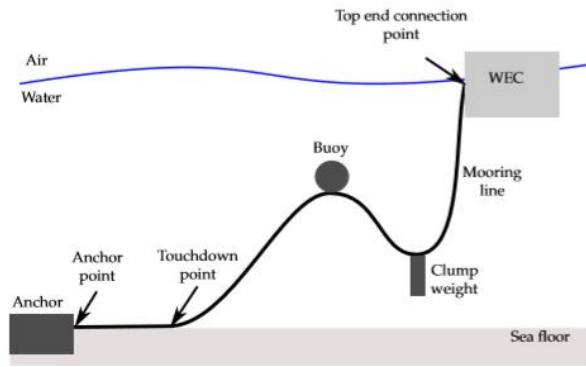


Figura 4.2 - Modelo físico da amarração [178]

Por falta de informação para cada um dos elementos representados da amarração. Aproveita-se a taxa de avarias geral anual de 0,185 o que faz pela fórmula dada anteriormente de 5,405 de MTBF. Na utilização deste valor podemos observar na figura 4.3 o declive acentuado da distribuição exponencial negativa até um valor aproximado de 34 anos.

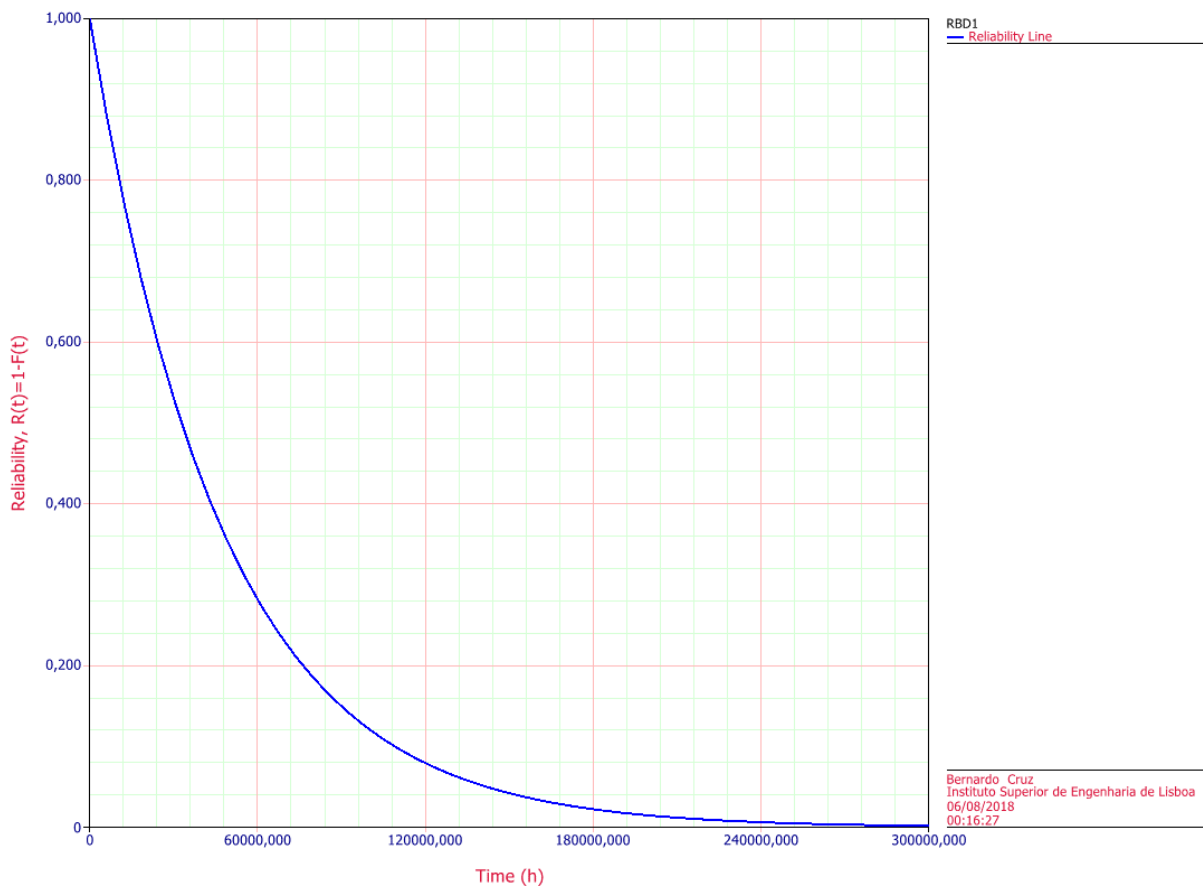


Figura 4.3 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo da amarração [RS]

$$R(t=730) = 0,954803; R(t=4380) = 0,757676; R(t=8766) = 0,573854$$

$$t(R=0,05) = 47283,990476 \text{ h}; t(R=0,0001) = 145374,020995 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 1662,987604 \text{ h} \text{ Mean Life} = 15776,221642 \text{ h}$$

Utilizando o modelo clássico é necessário que as três amarrações funcionem portanto estarão ligadas em série como mostra a figura 4.4, resultando num valor de final de vida aproximado de 2 anos.

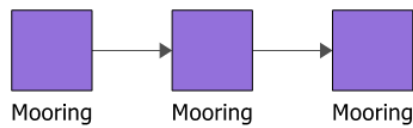


Figura 4.4 - RBD da Amarração [RS]

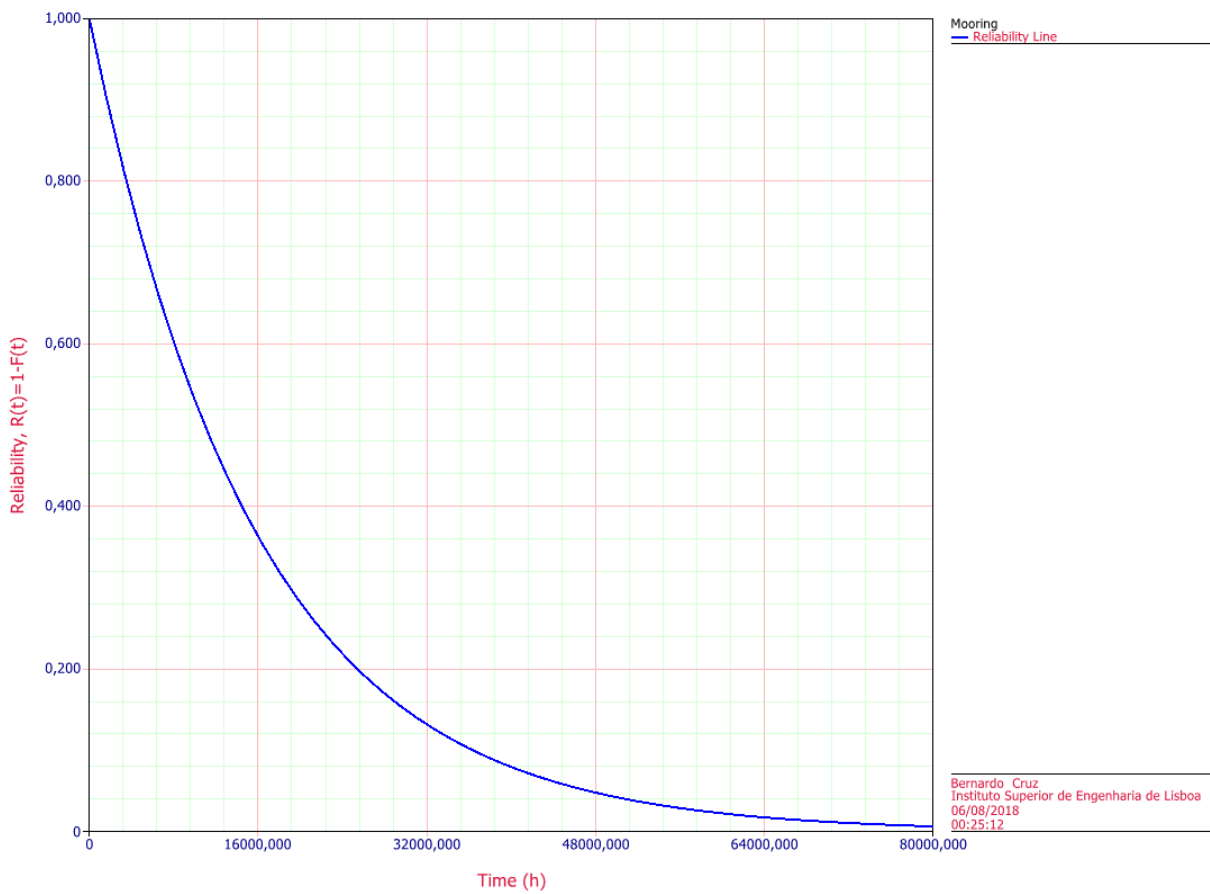


Figura 4.5 - Gráfico fiabilidade Vs tempo subsistema da amarração [RS]

$$R(t=730) = 0,999305; R(t=4380) = 0,977962; R(t=8766) = 0,92397$$

$$t(R=0,05) = 94697,42715 \text{ h} \quad B10\% \text{ Life} = 10318,21062 \text{ h} \quad \text{Mean Life} = 39446,11479 \text{ h}$$

#### **4.2.1.2 Outros componentes**

Os sensores e transdutores são componentes variados que medem os parâmetros de monitorização como são todos ligados em paralelo não influenciam a fiabilidade do projecto. É importante destacar que os sistemas *offshore* dependem destes para verificar a produção enérgica e quando os dados saiem fora do habitual são vistos por sensores redundantes para verificar as possíveis falhas nos sistemas a que estão acopolados.

Outros componentes necessários para o funcionamento do sistema WEC são: a estação meteorológica permite retirar valores sensíveis ao funcionamento e performance; a estação GPS permite localizar o sistema nas coordenadas, mas também na altitude, UPS é a unidade de gestão de informação que alguns sistemas WEC têm; e a estação de comunicação encarrega-se de transmitir os valores de cada parâmetro para uma estação de controlo.

### 4.2.1.3. Análise subsistema segurança e capacidade de sobrevivência

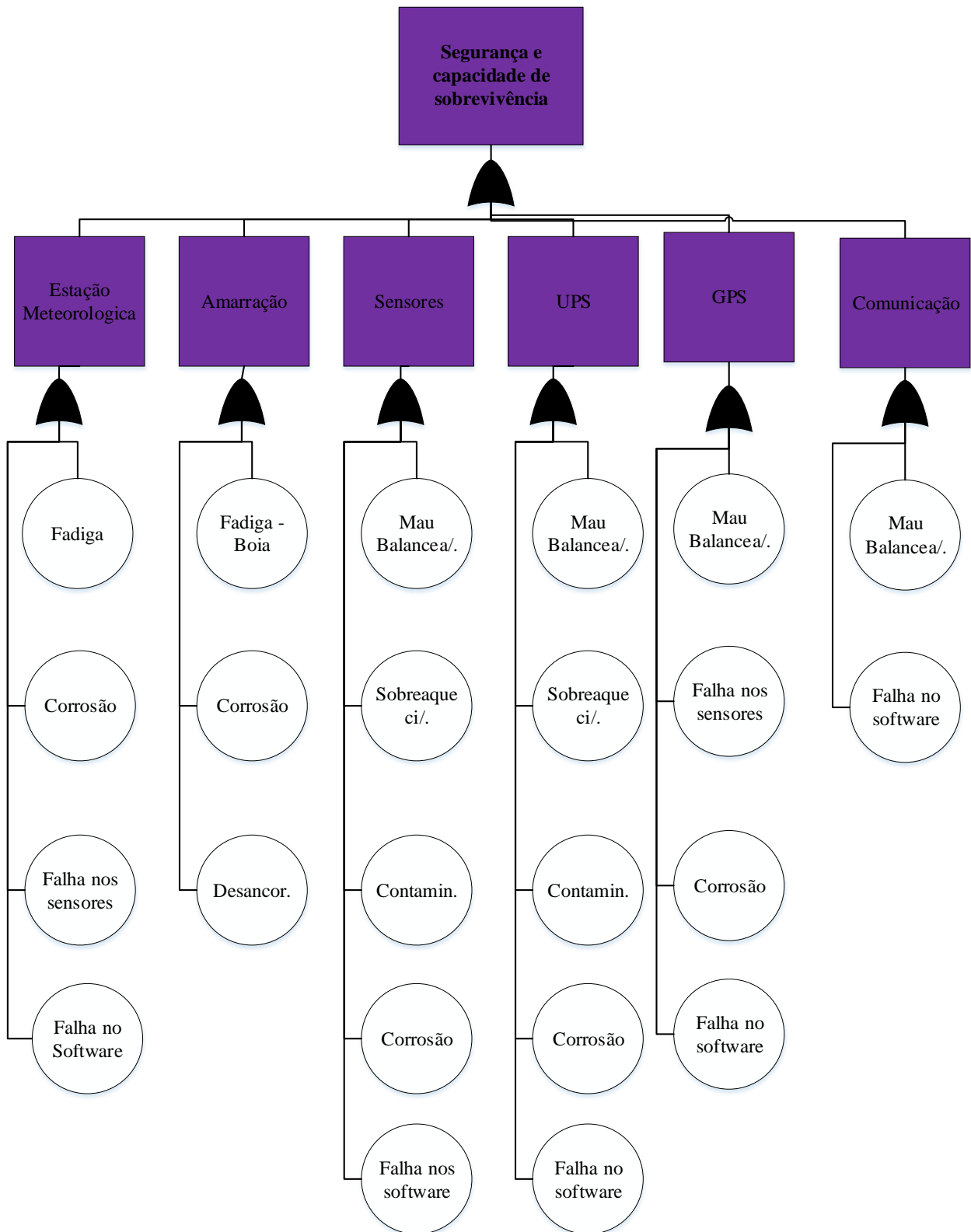


Figura 4.6 - FTA Subsistema da amarração

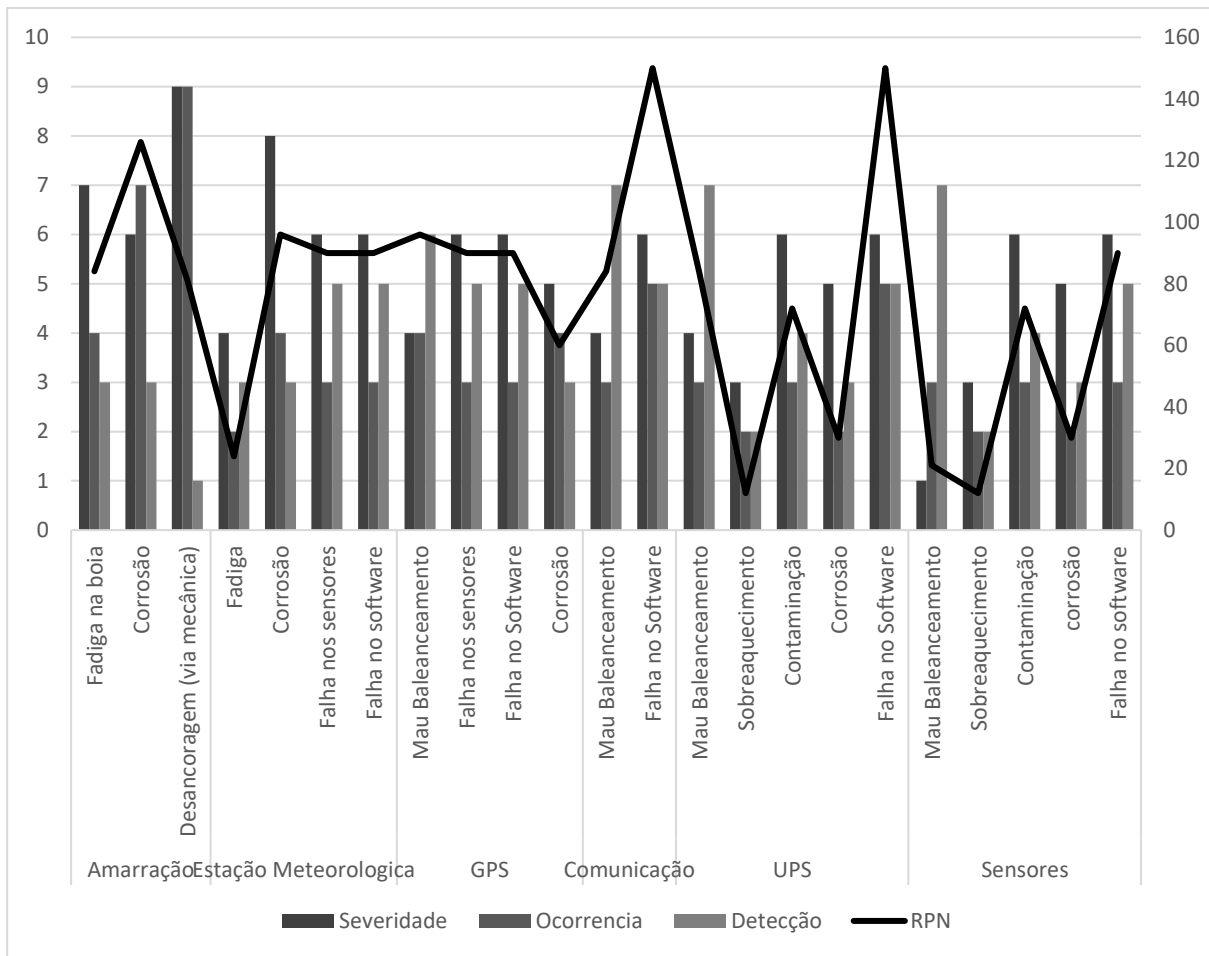


Figura 4.7 - Gráfico do subsistema da amarração

Pela análise do RPN (figura 4.7) podemos concluir que as falhas no software representam um grande risco deste subsistema. Isto deve-se ao facto de apenas serem detectadas na presença da equipa técnica no local ou por controlo dos valores com um range nos dados bem standardizados. E nas amarrações o risco encontra-se na corrosão que leva a destruição.

Na figura 4.6 podemos identificar as falhas da cada componente. Podemos verificar que as falhas estão identificadas como falhas mecânicas ou contaminações. A falha principal é desancoragem do dispositivo, ou seja, o dispositivo abandonar o local pretendido. As falhas intermédias possíveis são a ancora estar mal fixada; o cadeado por motivos de corrosão/fadiga desprender seja que cadeado for (da âncora, boia, contrapeso, WEC); a corrente por motivos de corrosão/fadiga/impacto romper



## 4.2.2 Subsistema Estrutural

### 4.2.2.1 Casco

O casco (*hull*) é o involucro que cobre toda a área do WEC. As falhas intermédias fazem parte do desgaste, fadiga e corrosão ou falhas nas juntas por forças mecânicas. O tempo de aquisição é de 34 h com o tempo de reparação de 12 h a taxa de avaria é de 0,0011 (MTBF = 909,0909). Podemos verificar na figura 4.8 que a utilizado o MTBF aproxima um tempo de vida não mensurável.

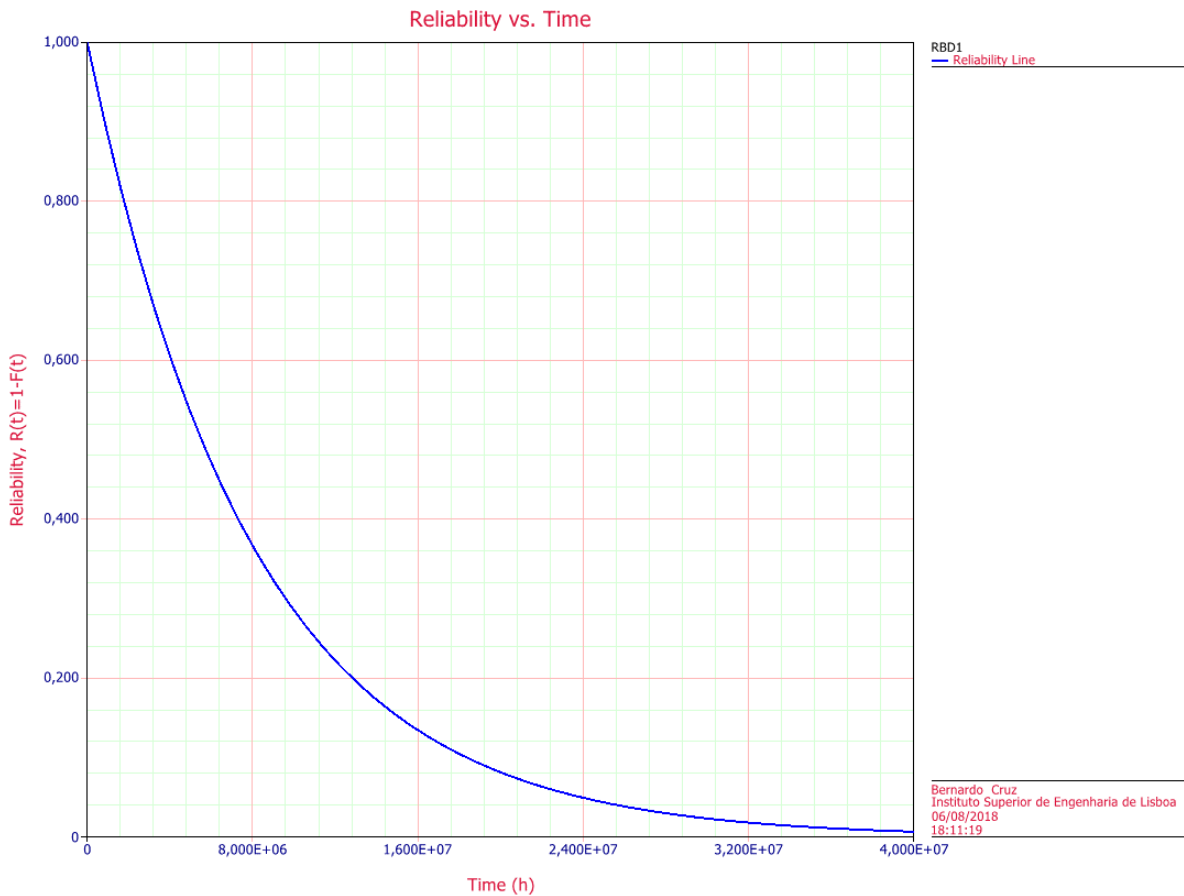


Figura 4.8 Gráfico fiabilidade Vs tempo do casco [RS]

$$R(t=730) = 0,999908; R(t=4380) = 0,999451; R(t=8766) = 0,998901$$

$$t(R=0,05) = 2,387326E+07 \text{ h} \quad B10\% \text{ Life} = 839627,527509 \text{ h} \quad \text{Mean Life} = 7,965273E+06 \text{ h}$$

### 4.2.2.2 Vedações

As **vedações** são placas que selam e protegem todo o sistema interior composto pela parte eléctrica e o PTO. A monitorização é feita através do mar e das atmosferas pois situações adversas é que poderam danificar esta estrutura. As falhas intermédias fazem parte do desgaste, fadiga e corrosão ou falhas nas juntas por forças mecânicas. O tempo de aquisição é de 64 h com o tempo de reparação de 15 h a taxa de avaria é de 0,0728. o número de elementos constante é de 12 que estarão ligados em série para efeitos de cálculo do sistema. O MTBF é de 13,736. Considerando este valor no *software* podemos ver na figura 4.9 que as vedações têm um tempo de vida útil compreendido nos 5 anos e meio.

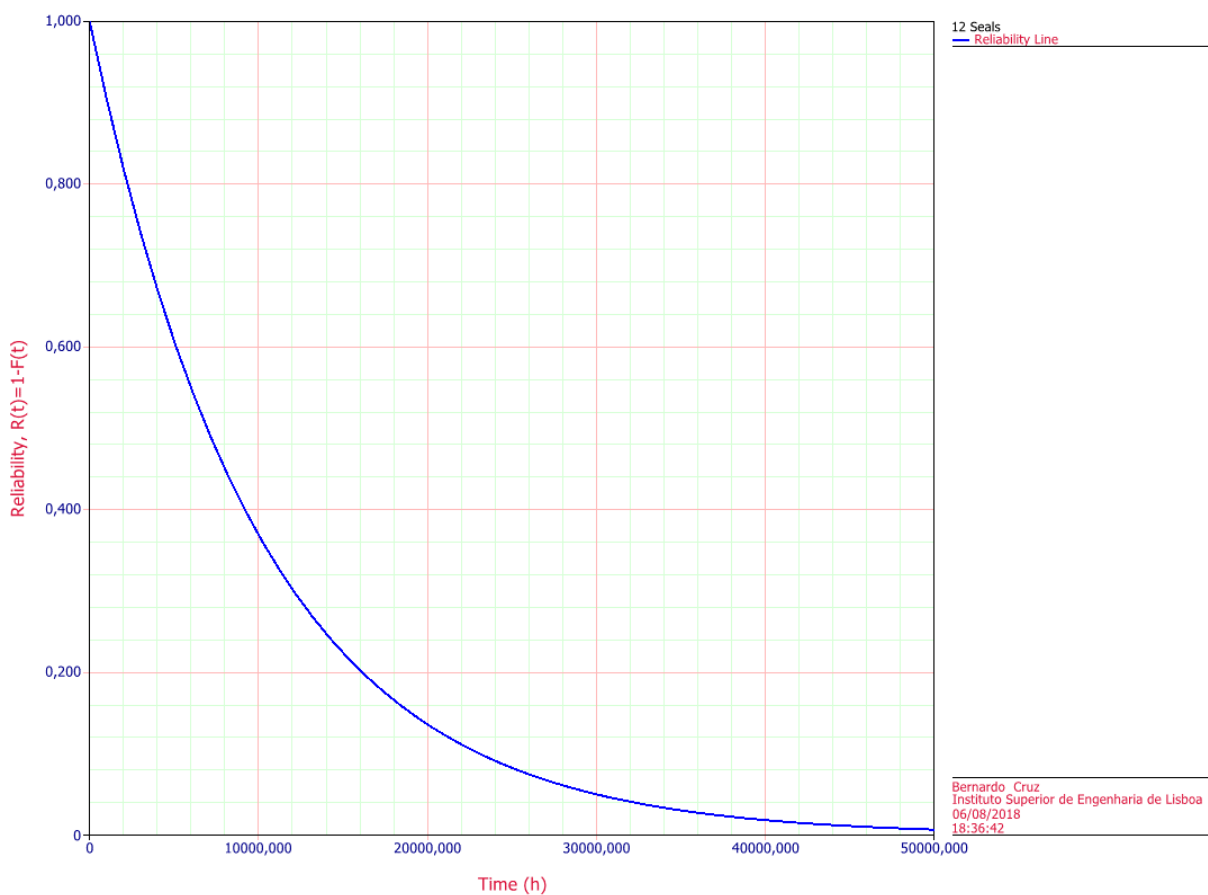


Figura 4.9 - Gráfico fiabilidade Vs tempo das vedações [RS]

$$R(t=730) = 0,929787; R(t=4380) = 0,646101; R(t=8766) = 0,417196$$

$$t(R=0,05) = 30039,623081 \text{ h} \quad \text{B10\% Life} = 1056,499680 \text{ h} \quad \text{Mean Life} = 10022,668286 \text{ h}$$

### 4.2.2.3 Juntas

**Juntas** são peças de ligação entre componentes. A fadiga e desgaste são as causas das falhas. O tempo de aquisição é de 52 h com o tempo de reparação de 44 h com uma taxa de avaria anual de 0,315. As juntas englobam o total de seis conjuntos de juntas a ter em conta. Na figura 4.10 podemos ver que o *software* calculou aproximadamente 2 anos de vida útil.

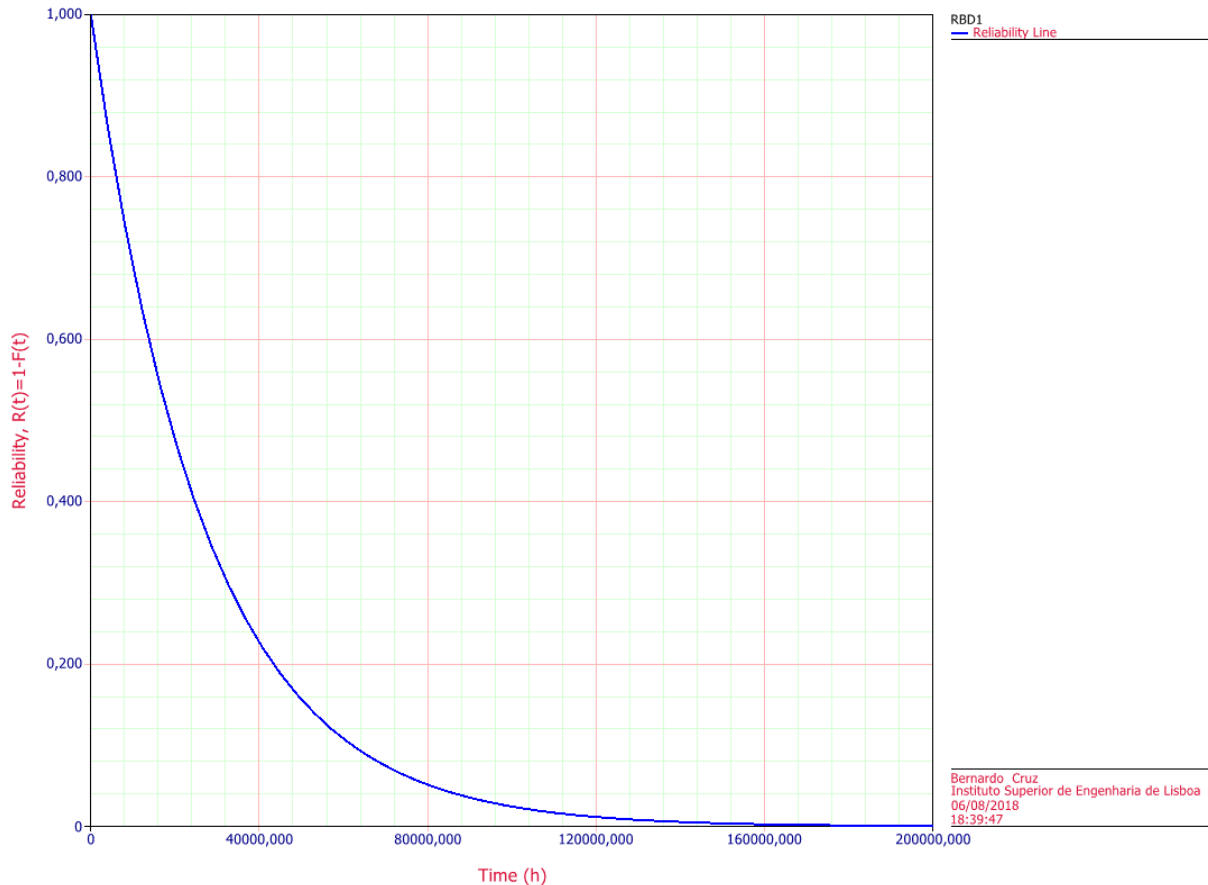


Figura 4.10 Gráfico fiabilidade Vs tempo das juntas [RS]

$$R(t=730) = 0,973280; R(t=4380) = 0,850016; R(t=8766) = 0,722367$$

$$t(R=0,05) = 80746,506822 \text{ h} \quad B10\% \text{ Life} = 2839,871130 \text{ h} \quad \text{Mean Life} = 26940,932346 \text{ h}$$

### 4.2.2.4 Análise do subsistema estrutural

Através do software reliasoft podemos conferir o sistema através do diagrama de blocos na figura 4.11. No geral a taxa de avarias comporta-se como mostra a figura 4.12 esta exponencial negativa assegura como vida útil deste subsistema um valor aproximado de 4,5 anos. É de realçar a

importância da instalação e transporte da estrutura constituída por falha humana ou por causas naturais

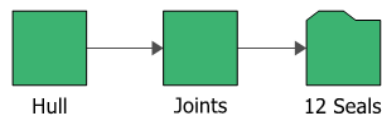


Figura 4.11 RBD do Subsistema Estrutural [RS]

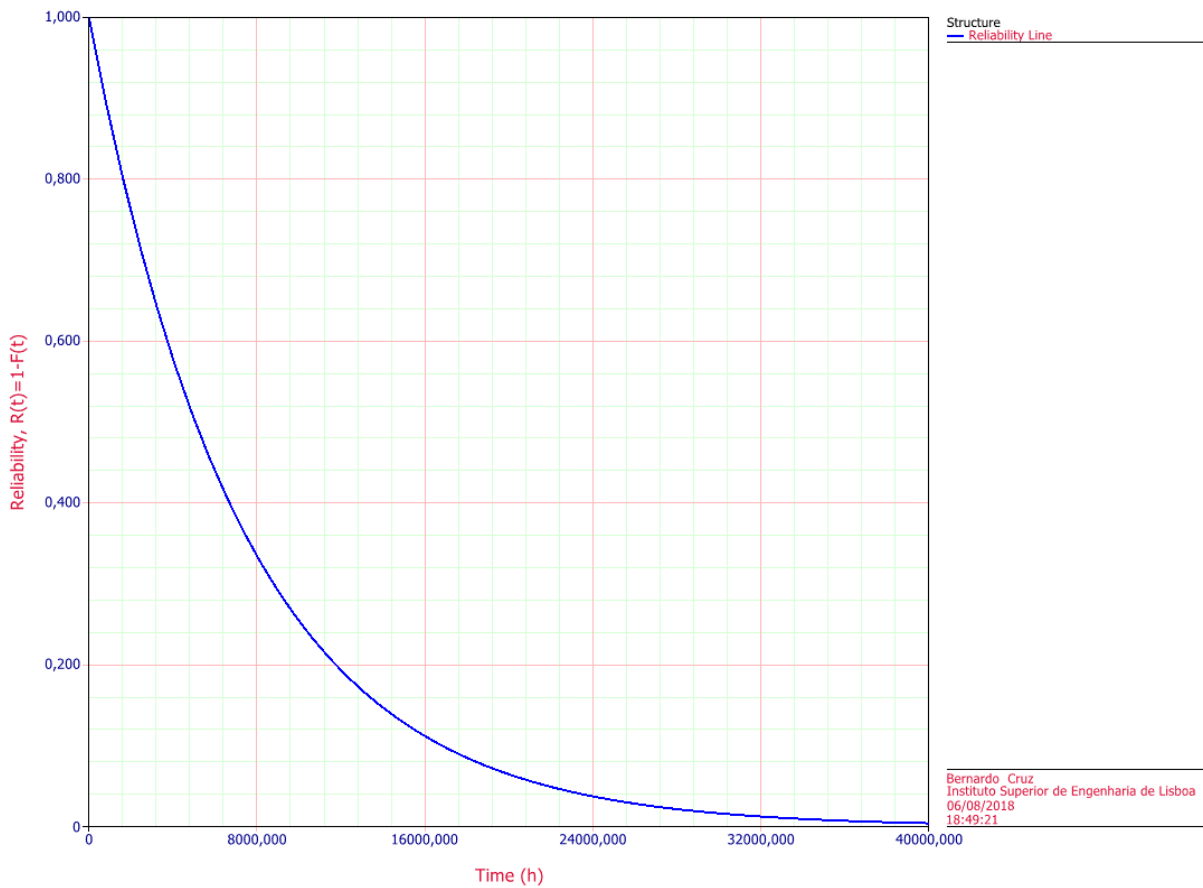
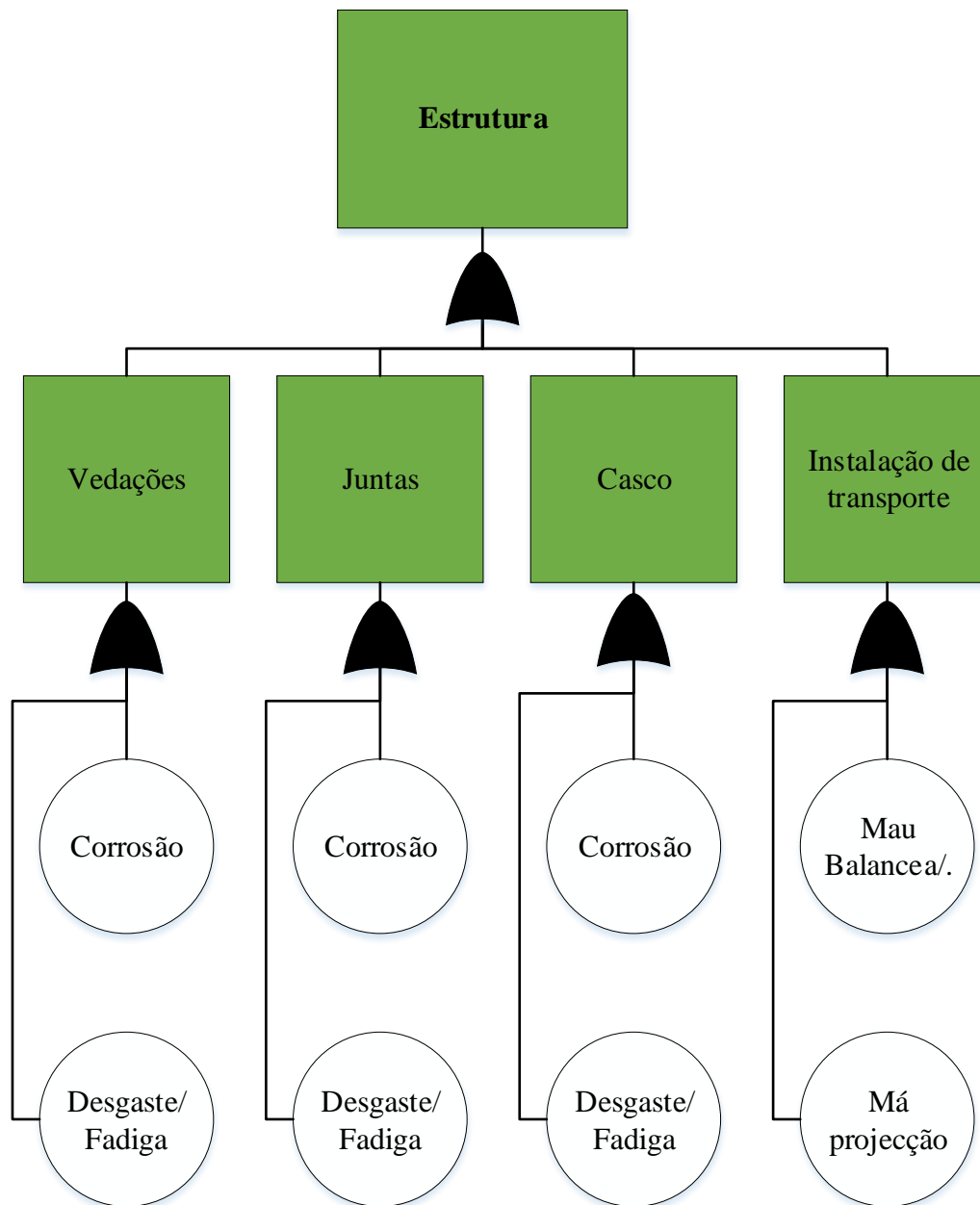


Figura 4.12 Gráfico fiabilidade Vs tempo do subsistema estrutural [RS]

$$R(t=730) = 0,904860; R(t=4380) = 0,548894; R(t=8766) = 0,301037$$

$$t(R=0,05) = 21874,327908 \text{ h} \quad B10\% \text{ Life} = 769,324578 \text{ h} \quad \text{Mean Life} = 7298,331674$$

$$ht(R=0,0001) = 83897,79302\text{h}$$



*Figura 4.13 - FTA do subsistema estrutural*

As falhas neste subsistema são determinativas para o funcionamento geral do sistema WEC, pois podem danificar qualquer outro subsistema existente. A falha deste componente não só danifica todas as peças interiores como pode levar a ruptura total do WEC normalmente são associados problemas de desgaste e de corrosão como podemos ver na figura 4.13.

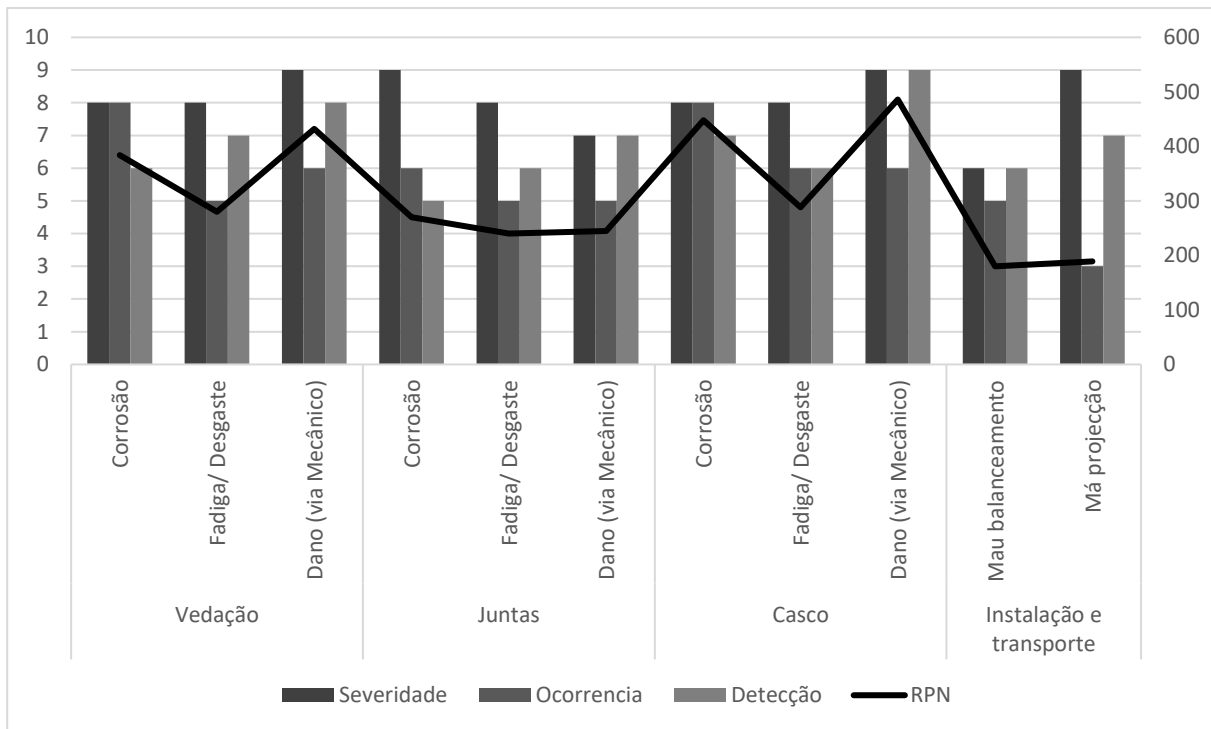


Figura 4.14 - Gráfico de FMEA do Subsistema Estrutural

Segundo a figura 4.14, o subsistema estrutural confere o risco não é só na corrosão ou nos danos mecânicos, mas as falhas encontram-se com RPN com pouca diferença. Fica importante os técnicos de manutenção estarem focados nas mudanças climáticas e nas camaras de vigilância. O dano mecânico pode englobar impactos com animais, barcos, marés mais fortes e como as variáveis são muitas torna-se difícil a mesma prevenção.

## 4.2.3 Subsistema de Conversão de Potência

### 4.2.3.1 Cilindro Hidraulico

No subsistema de conversão de potência (PTO), o primeiro componente da cadeia é o **cilindro hidráulico** (*RAM hidraulic*) é o circuito de bomba de água responsável pela compressão e descompressão em relação ao movimento vertical imposto pelas ondas do mar [182]. O tempo de aquisição é de 15 horas, o tempo de reparação é de 15h, a taxa de avarias por ano é de 0,2436 (MTBF= 4,105090312) é crítico e tem só um elemento [67]. As falhas são corrosão, desgaste, ou limites de trabalho baixos. É monitorizada através de sensores que leem a velocidade angular e o torque nas válvulas de admissão e saída. Não é comum haver sistema redundante.<sup>2</sup> Neste componente (observando a figura 4.15) pouca preocupação ao nível do tempo de vida útil.

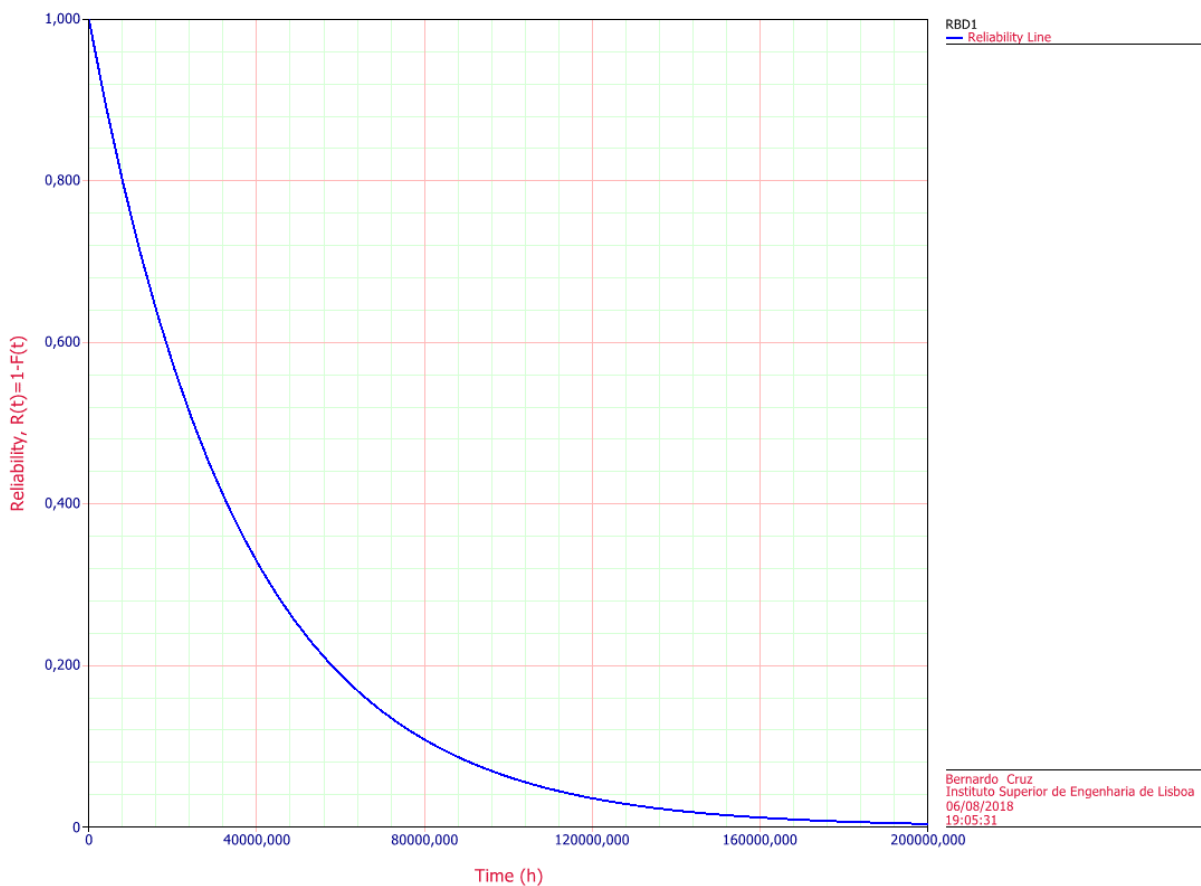


Figura 4.15 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo Cilindro hidráulico [RS]

$$R(t=730) = 0,979905; R(t=4380) = 0,885325; R(t=8766) = 0,783670$$

$$t(R=0,05) = 107728,303434 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 3788,826425 \text{ h}; \text{Mean Life} = 35943,362119 \text{ h}$$

<sup>2</sup> Steel frame and lever 122 \$ dólar, Cylinder 236 \$dolar , Check valves 18 \$.

### 4.2.3.2 Conjunto de distribuição

O conjunto de distribuição (*manifold*) é o componente responsável pela distribuição após a receção da energia potencial no cilindro hidráulico que divide para os acumuladores de alta e baixa pressão. As falhas intermédias designam-se distribuição malfeita para os acumuladores, entupimento do fluido, mau balenciamento e/ou distribuição. Um filtro de ar no inicio e normalmente mede-se o caudal dos fluidos. O tempo de aquisição é de 21 h com o tempo de reparação de 25 h a taxa de avaria anual é de 0,004 (MTBF=250) é crítica como mostra a figura 4.16. Possivel existência de sistema redundante, mas é mais comum haver nos acumuladores. Controlo pelas válvulas da temperatura e pressão na válvula de admissão. Causas devido a contaminação do fluido de pressão, pressão a cima do esperado, presença de ar, implusão, cavitação, temperaturas altas.<sup>3</sup>

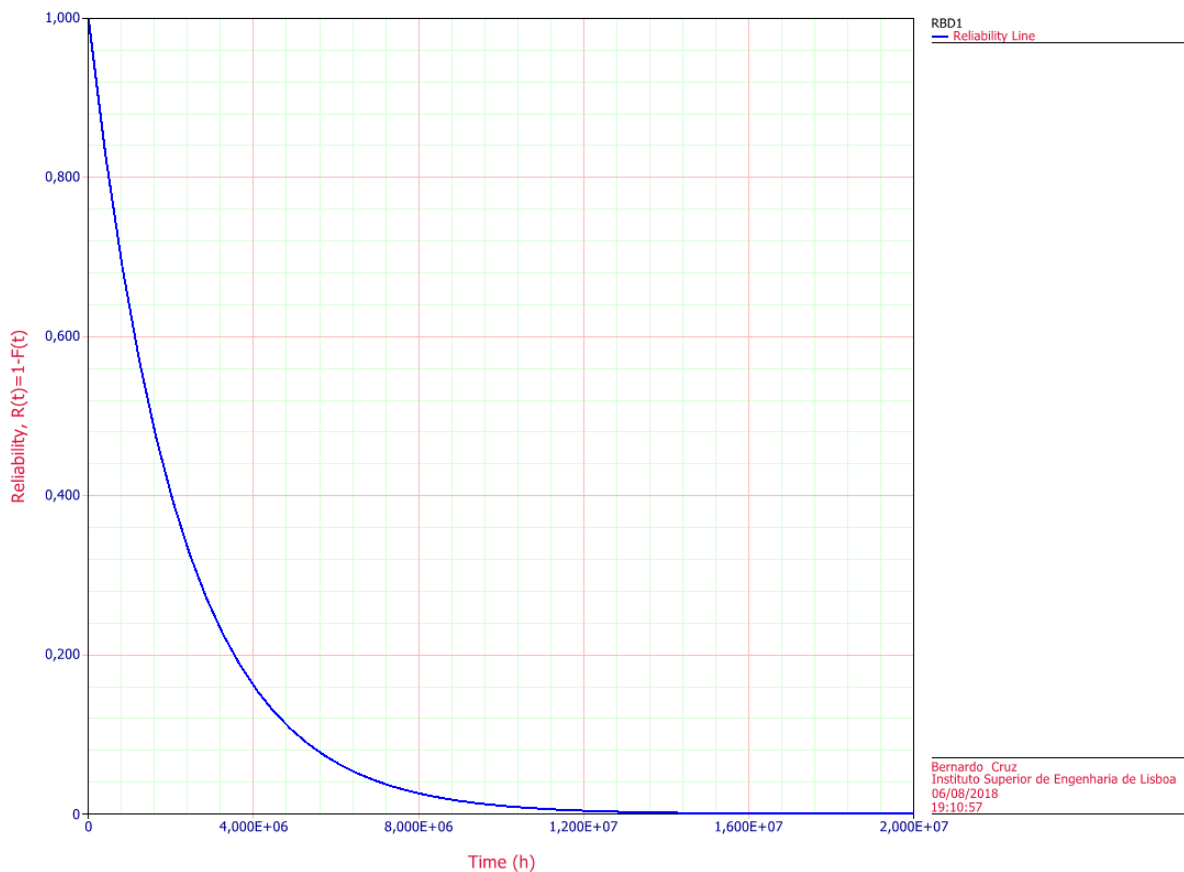


Figura 4.16 - Gráfico fiabilidade Vs tempo do tubo de distribuição [RS]

$$R(t=730) = 0,999667; R(t=4380) = 0,998003; R(t=8766) = 0,996008$$

$$t(R=0,05) = 6,565141E+06 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 230897,355129 \text{ h}; \text{Mean Life} = 2,190448E+06 \text{ h}$$

<sup>3</sup> Air filter 17 \$, Bearings, pipes, tubing – 242



### 4.2.3.3 Acumulador

O acumulador é responsável por armazenar a energia, absorve pulsações, amortece choques, e nivela a pressão de saída baixa ou alta pressão. As falhas inerentes dizem respeito à pressão na precarga alta, ou redução na pressão do sistema, ou precarga muito baixa. precarregamento muito rápido. se é monitorizada, controlo de fluido e pressão na entrada e saída. O tempo de aquisição é de 12h e de reparação de 8h a probabilidade de falha é de 0.4208 quer de alta ou baixa pressão. O que para além dos rolamentos é o que tem a maior taxa de avaria. Faz sentido usar o sistema redundante apesar do preço e a fiabilidade ser aceitável como mostra a figura 4.17, apesar que nos artigos indicar apenas um acumulador para cálculos de fiabilidade existe certamente acumuladores diferentes para cada nível.<sup>4</sup>

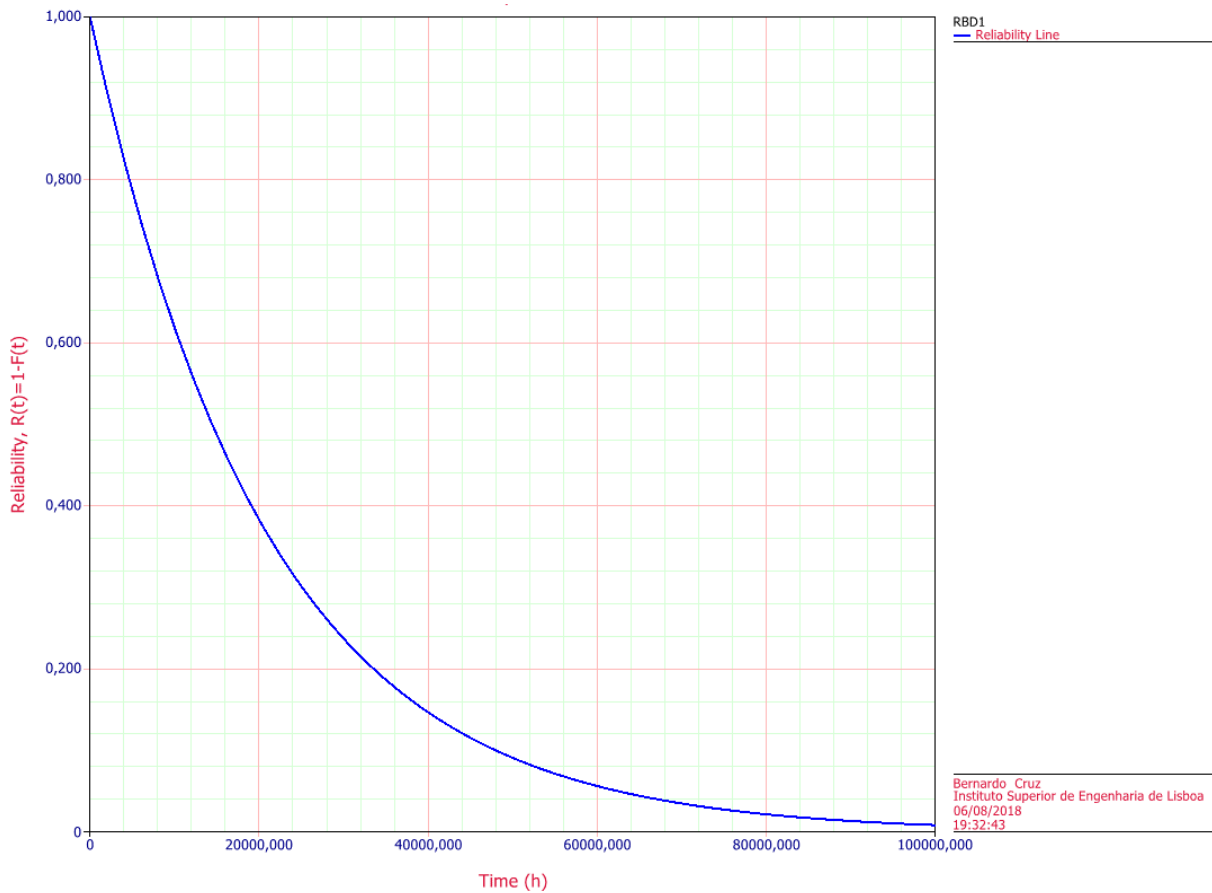


Figura 4.17 - Gráfico fiabilidade Vs tempo do acumulador [RS]

$$R(t=730) = 0,965564; R(t=4380) = 0,810377; R(t=8766) = 0,656521$$

$$t(R=0,05) = 62406,249926 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 2194,840557 \text{ h}; \text{Mean Life} = 20821,737353 \text{ h}$$

<sup>4</sup> Accumulator 204\$

#### 4.2.3.4 Motor

Motor hidráulico transforma a energia de um fluido (água ou óleo) em movimento em energia mecânica. Os motores hidráulicos podem ser enquadrados de acordo com duas formas de energia: motores de gravidade ou nível (quando converte em trabalho útil a energia de nível  $h$ ), motores de pressão (convertem em trabalho útil a energia cinética  $v^2/2g$ )

O tipo de motor é motor *swashplate* porque permite caudais instáveis causados pelos valores incertos e imprevistos das ondas do mar. Contem 9 pistons ou mais presos a um *swashplate* que com certa inclinação faz pressão ou alivia o fluido dentro dos cilindros explicado na figura 4.18 [183].

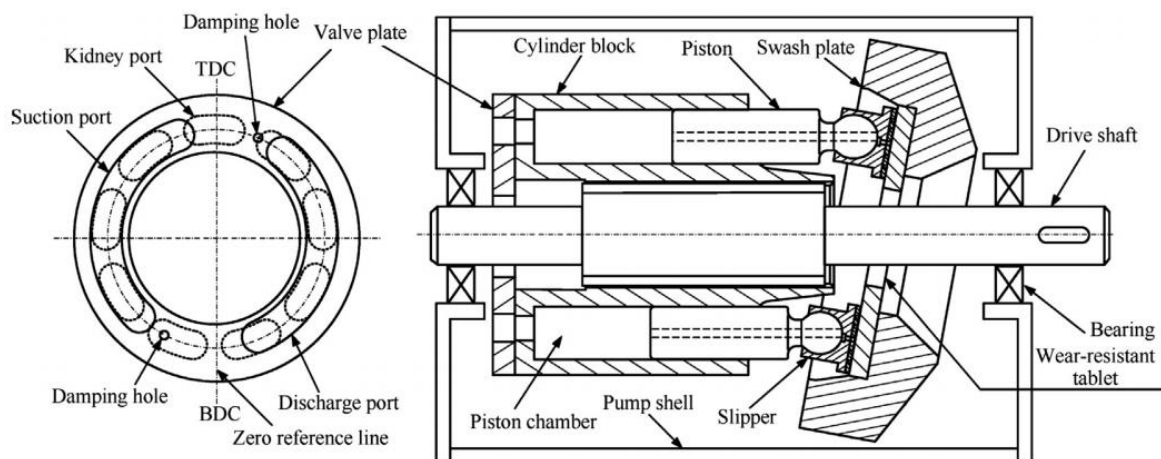


Figura 4.18 - Modelo esquemático do motor swashplate [183]

A falha base e intermedias. Arraste do rotor, sobrecarga, curto-circuito, sistema de refrigeração ou desgaste ou vibração são as falhas possíveis do motor hidráulico. Avarias: rolamentos (tem tempo de vida) (6 pistons) pistons (desgaste) segmentos, pratos oscilatórios (as molas) É controlado através de válvulas a entrada e saída. Que medem vibrações, caudais e temperaturas. E um sensor que mede o angulo do swash plate. O tempo de aquisição é de 14h com o tempo de reparação de 6h a taxa de avaria é de 0.17.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> KAWASAKI K3VL45/A-10RKS-P0 SWASH-PLATE AXIAL PISTON PUMP - 388.62 eur / Vane Motor 998\$

Um outro tipo de motor utilizado é o motor centrífugo com palhetas. A pressão é distribuída para as palhetas como mostra a figura 4.19. palheta que consuante a pressão ela deforma, rolamentos (tem tempo de vida)

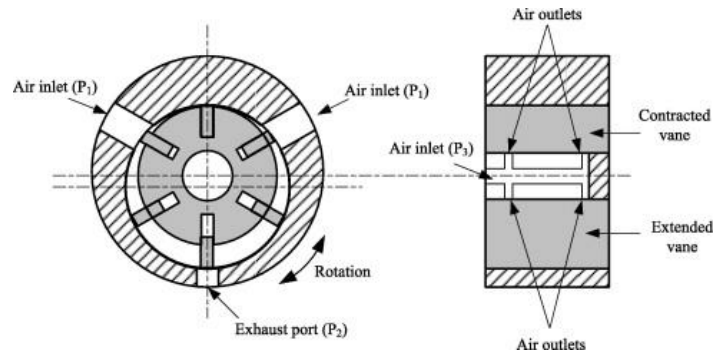


Figura 4.19 - Modelo esquemático do motor centrífugo com palhetas [183]

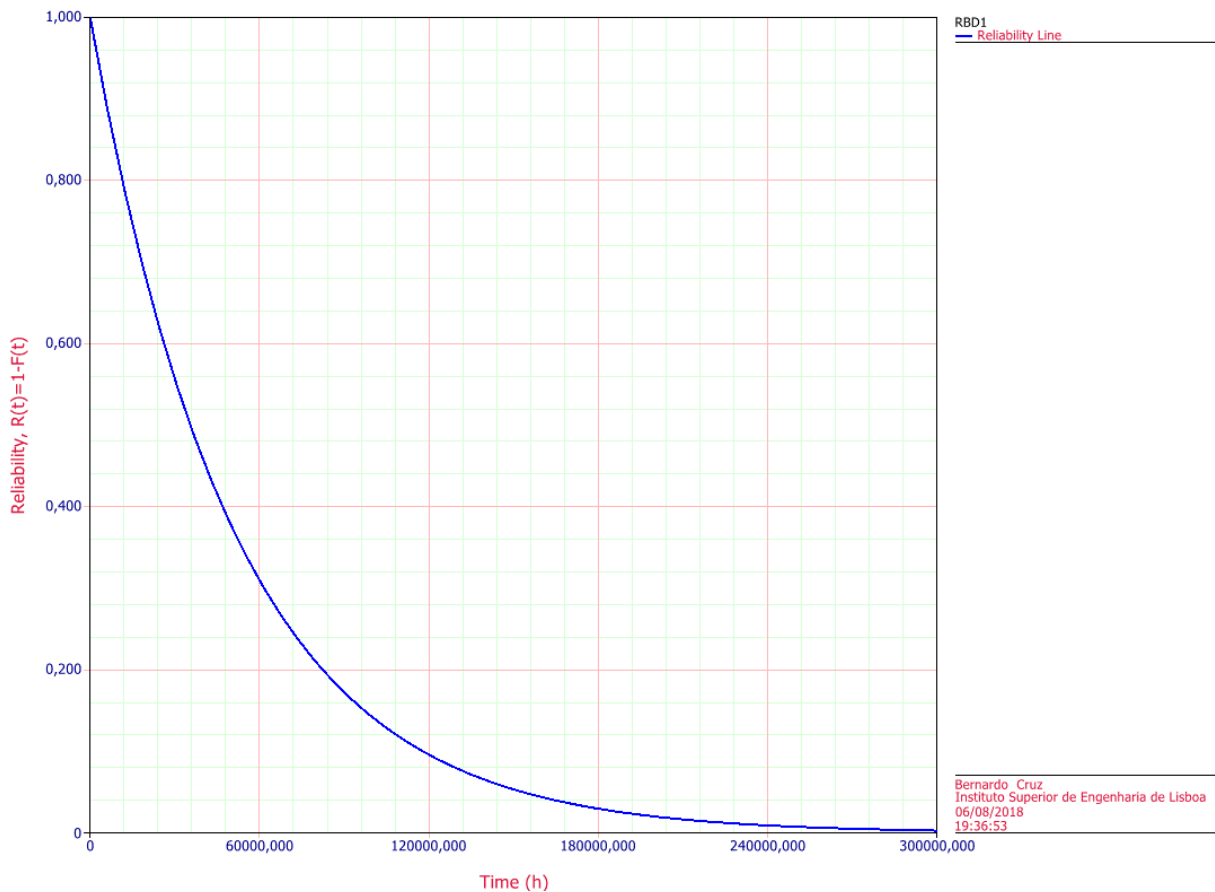


Figura 4.20 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo do motor [RS]

$$R(t=730) = 0,985835; R(t=4380) = 0,917961; R(t=8766) = 0,842554$$

$$t(R=0,05) = 153286,300905 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 5391,110499 \text{ h Mean Life} = 51143,709180 \text{ h}$$

### 4.2.3.5 Gerador

O gerador utiliza a energia mecânica e transforma em energia eléctrica. A falha na lubrificação e refrigeração, baixa temperatura no líquido refrigerante, carbonização, fuga de óleo. As falhas podem surgir pela fuga de óleo, temperaturas altas, falhas no controlador, fugas de óleo, por desgaste ou fadiga. Pode ser monitorizada por voltagem e amperagem a saída do gerador. O tempo de aquisição é de 5 h com 6 h de reparação com uma taxa de avaria de 1,59 por ano, observado na figura 4.21. Faz todo o sentido existir um sistema redundante de forma a aumentar a fiabilidade do sistema<sup>6</sup>.

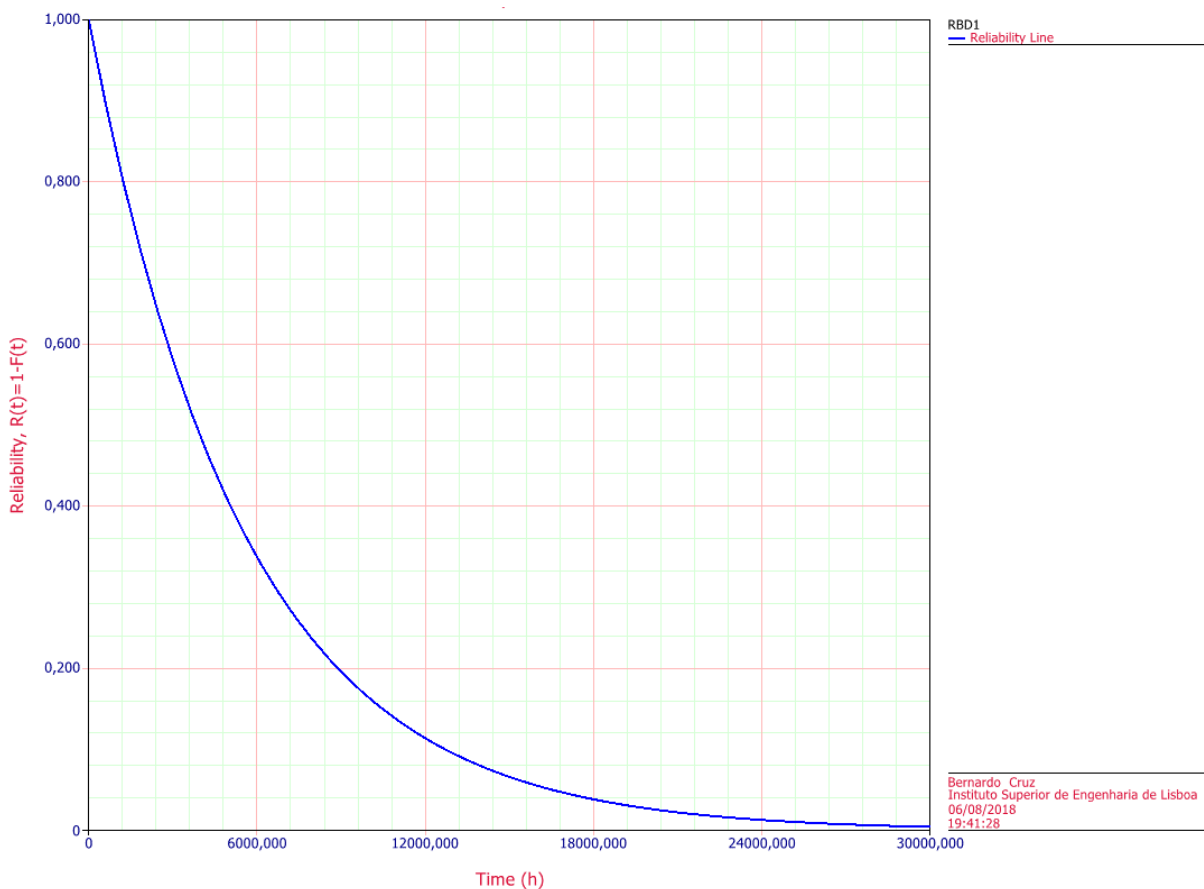


Figura 4.21 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo do gerador [RS]

$$R(t=730) = 0,876049; R(t=4380) = 0,452033; R(t=8766) = 0,204112$$

$$t(R=0,05) = 16525,576020 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 581,207883 \text{ h}, \text{ Mean Life} = 5513,729857 \text{ h}$$

<sup>6</sup> Max 500 W Wind Turbine Generator DC 12/24V 5 Blade W/ Windmill Charge Controller - 152.28 EUR. Gerador e componentes electricos 100 \$

### 4.2.3.6 Análise do subsistema PTO

Neste subsistema dividimos em cinco componentes pela ordem enunciada na figura 4.22, e comporta-se com a taxa de avarias exponencial negativa como vemos na figura 4.23 com um MTBF cerca de 20000 horas.

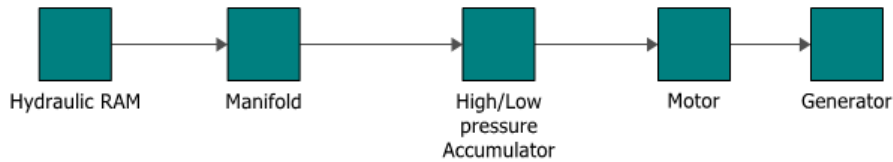


Figura 4.22 - RBD do subsistema PTO[RS]

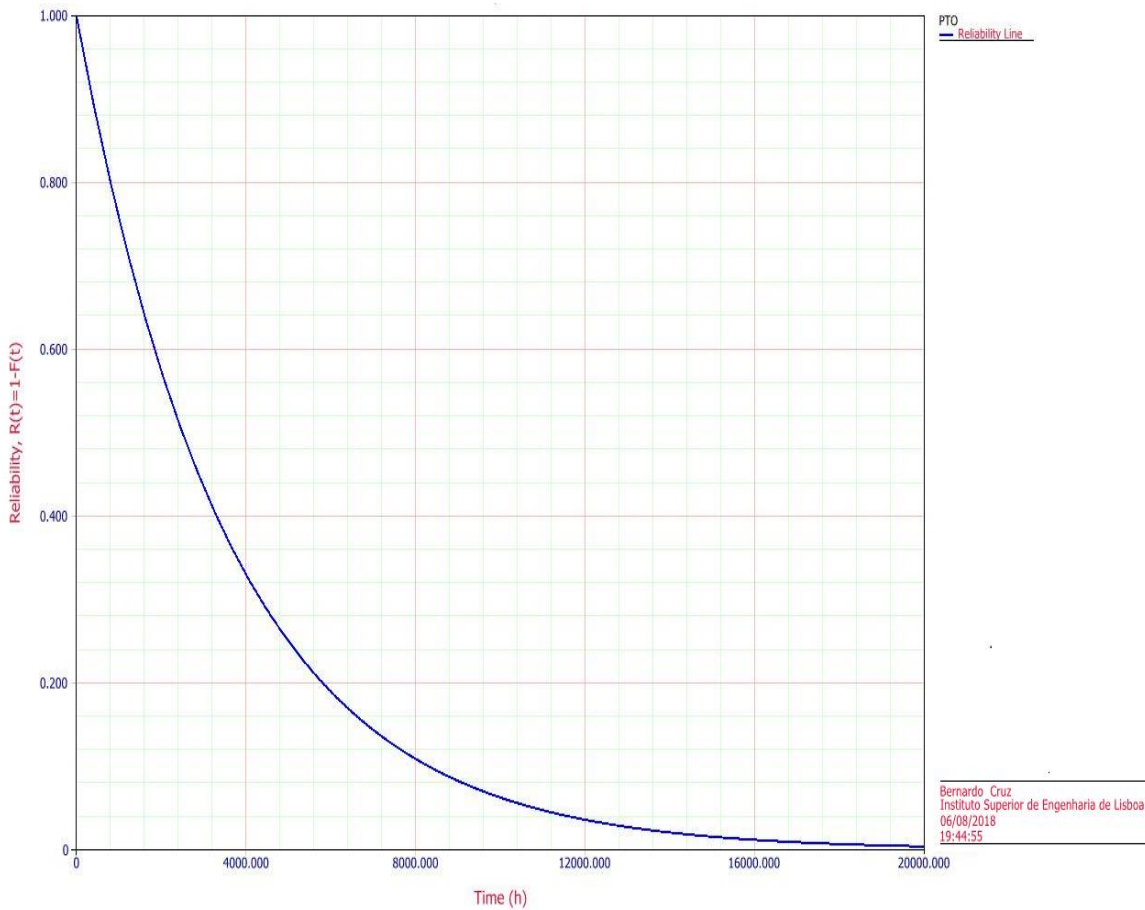


Figura 4.23 – Gráfico de Fiabilidade Vs Tempo do subsistema PTO [RS]

$$R(t=730) = 0,816870; R(t=4380) = 0,297109; R(t=8766) = 0,088127$$

$$t(R=0,05) = 10811,398674 \text{ h}; t(R=0,0001) = 33239,506268 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 380,239099 \text{ h} \text{ Mean Life} = 3607,204469 \text{ h}$$

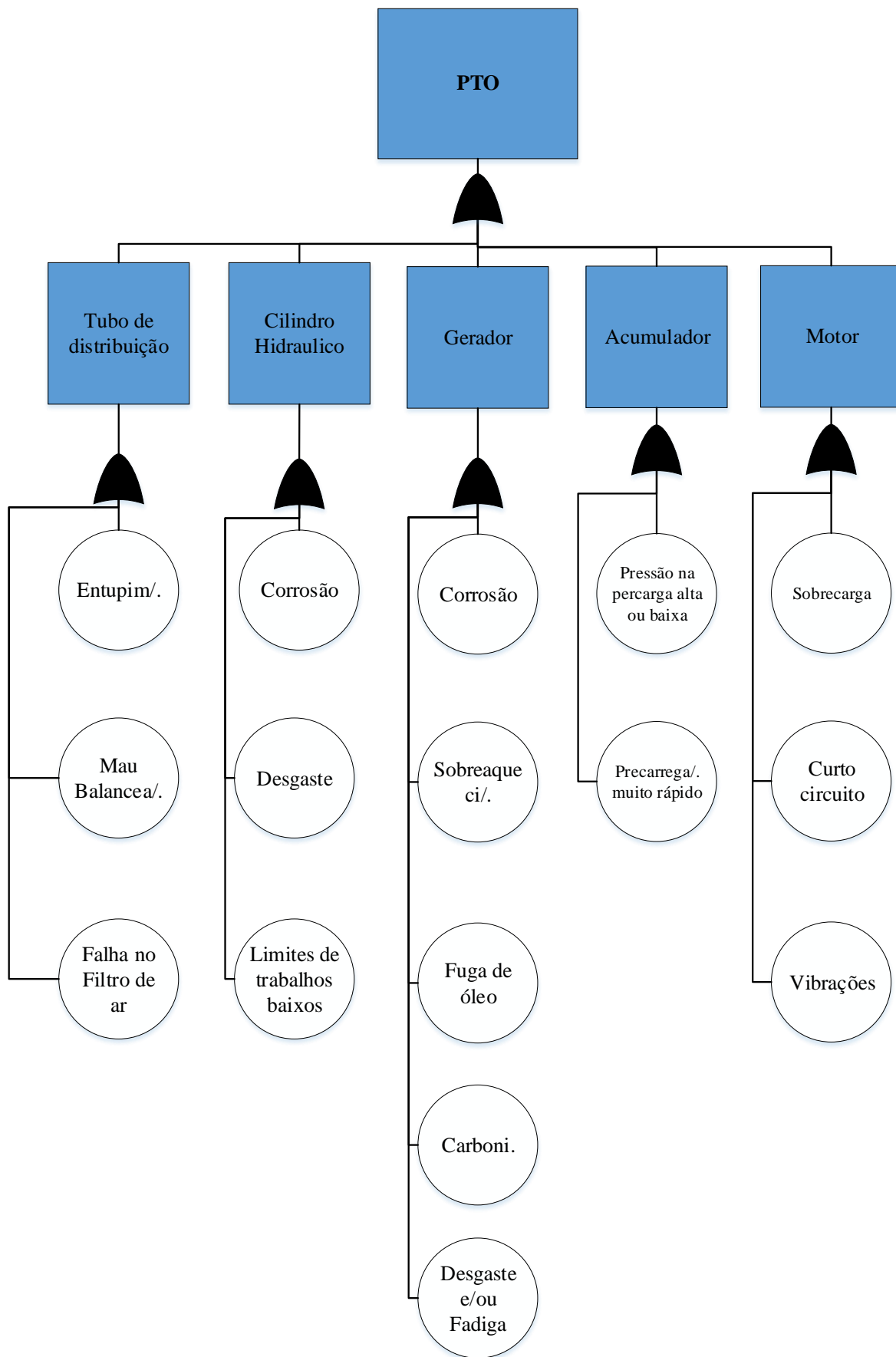


Figura 4.24 - FTA do subsistema PTO

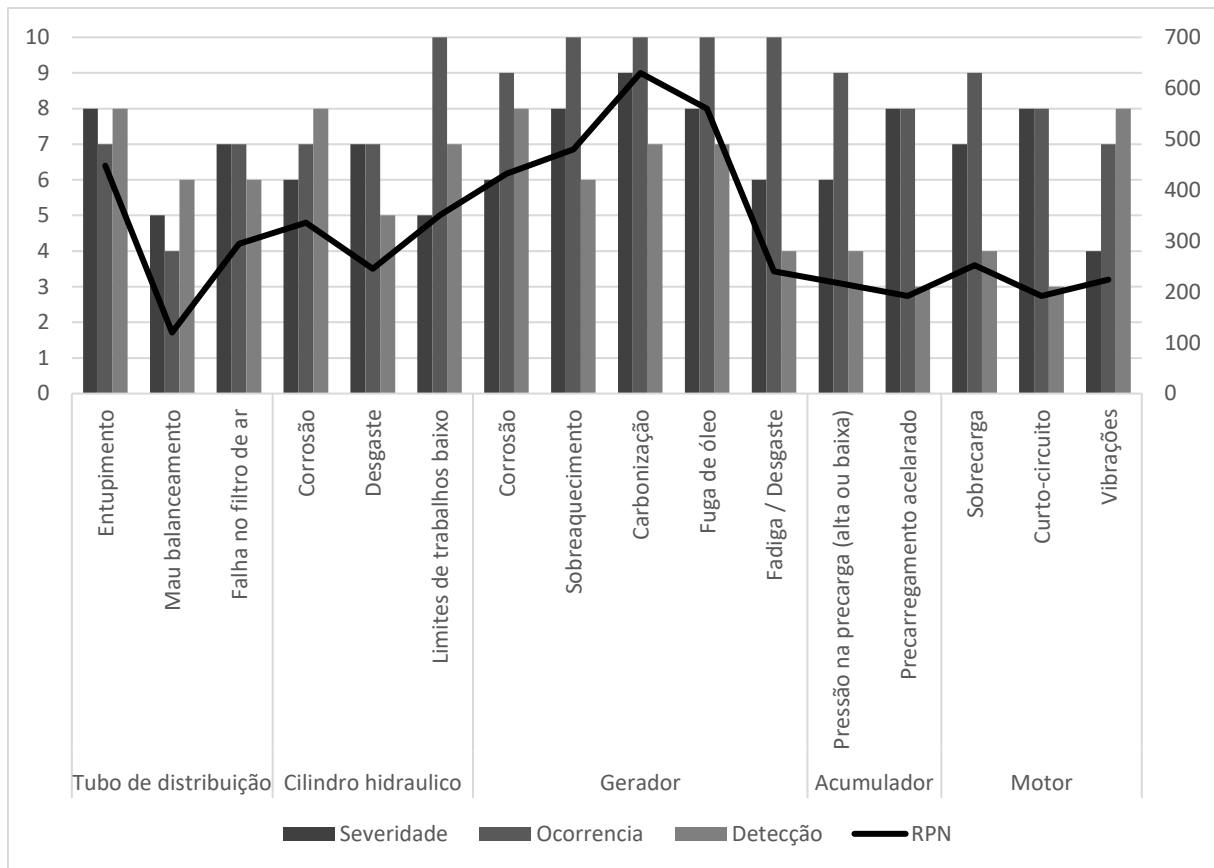


Figura 4.25 - Gráfico FMEA do subsistema PTO

Na figura 4.24 podemos verificar que as falhas deste subsistema conferem um grande risco ao nível do fluido de compressão nomeadamente fugas, desgaste, ou altas/baixas temperaturas.

No PTO nota-se um declive muito acentuado no gerador, como podemos ver na figura 4.25, onde existe maiores ocorrências de falhas destacando a carbonização e a fuga de óleo. Estes dois riscos são detectados com os sensores a entrada e saída do gerador pela análise da corrente eléctrica estimando os valores aproximados que vai desde não haver movimento marítimo até ao movimento com mais força.

## 4.2.4 Transmissão de corrente

### 4.2.4.1 Barra coletora

A barra colectora (*busbar*) é uma chapa de metal para distribuição de energia de alta corrente. O 415 V busbar tem um tempo de aquisição de 12 h, de reparação de 32 h e taxa de avaria anual de 0,01 com a distribuição detalhada na figura 4.27. As falhas intermédias são: curto circuito, rompimento dos cabos ou deformação da placa. É monitorizada através de um transdutor piezoelectrico.

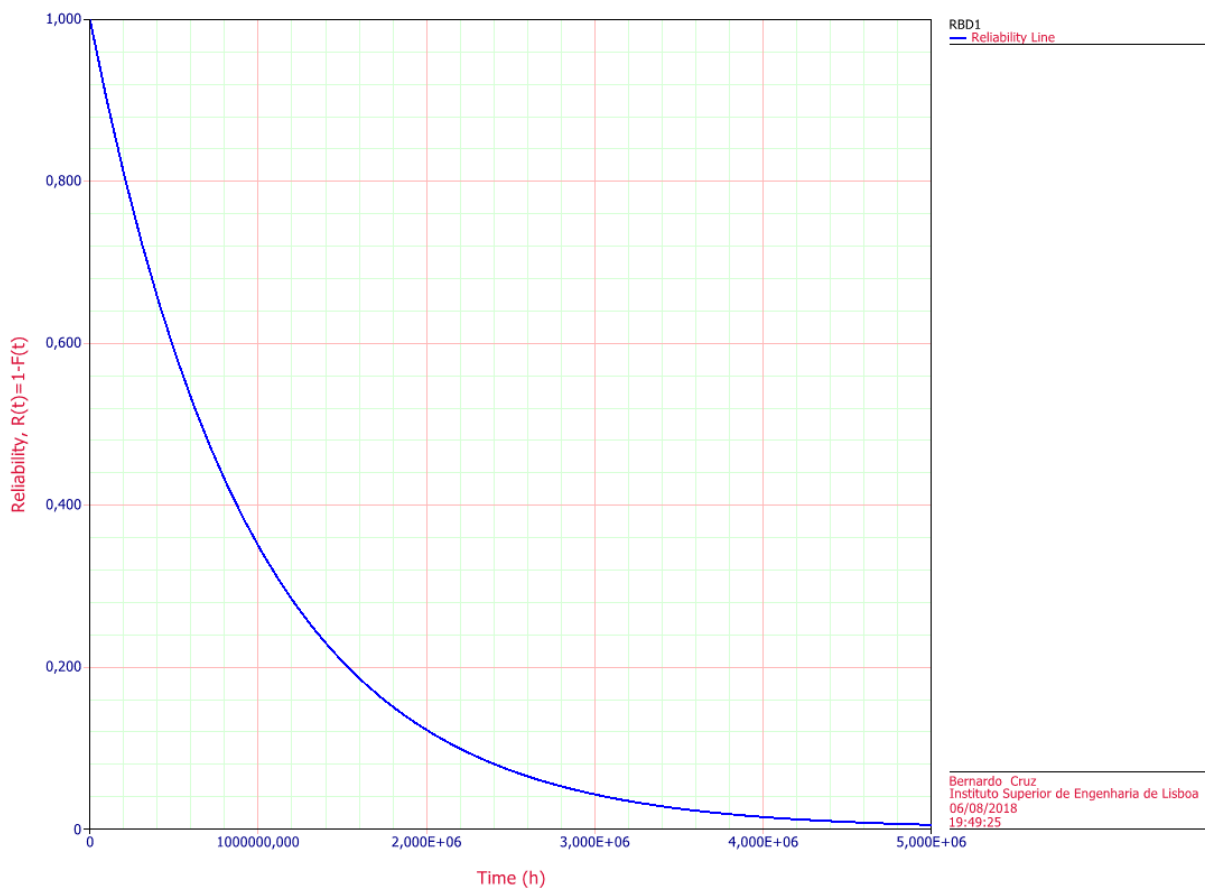


Figura 4.26 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo da barra colectora [RS]

$$R(t=730) = 0,999234; R(t=4380) = 0,995411; R(t=8766) = 0,990836$$

$$t(R=0,05) = 2,852458E+06 \text{ h} \text{ B10\% Life} = 100321,534498 \text{ h Mean Life} = 951717,718938 \text{ h}$$



### 4.2.4.2 Transformador

O transformador AC é um componente eléctrico estático que transmite energia entre circuitos por indução electromagnética. Usando uma bobine produz um campo magnético e esta oscilação cria uma força eletromotriz, o que faz com que a potência eléctrica não tenha grandes taxas de potência dissipada. Pode ser controlada com voltímetro e amperímetro na saída ligados em paralelo. O tempo de aquisição é de 21 h com o tempo de reparação de 5 h a taxa de avaria é de 0,07 com uma distribuição face a fiabilidade descrita na figura 4.27

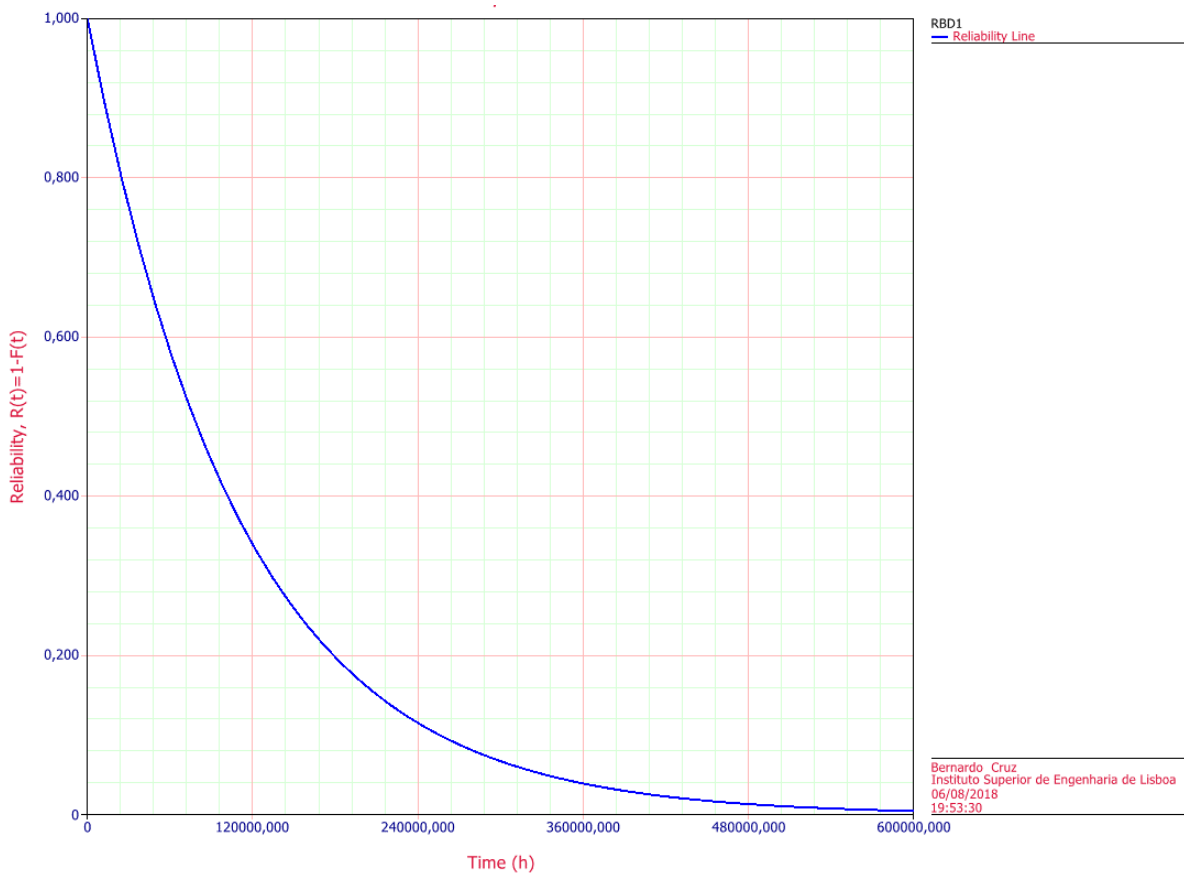


Figura 4.27 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do transformador [RS]

$$R(t=730) = 0,993445; R(t=4380) = 0,961310; R(t=8766) = 0,924067$$

$$t(R=0,05) = 332534,368063 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 11695,301614 \text{ h}; \text{Mean Life} = 110949,516769 \text{ h}.$$

### 4.2.4.3 Disjuntor

Disjuntor (*circuit breaker*) serve para cortar a corrente eléctrica. As falhas é sobrecarregamento, más definições das posições, curto circuito, falha na terra. O tempo de aquisição é de 11 h com o tempo de reparação de 12 h a taxa de avaria é de 0,22 apesar do risco associado a este componente é possível apaziguar com a figura 4.28 que mostra o MTBF superior aos 289 anos.

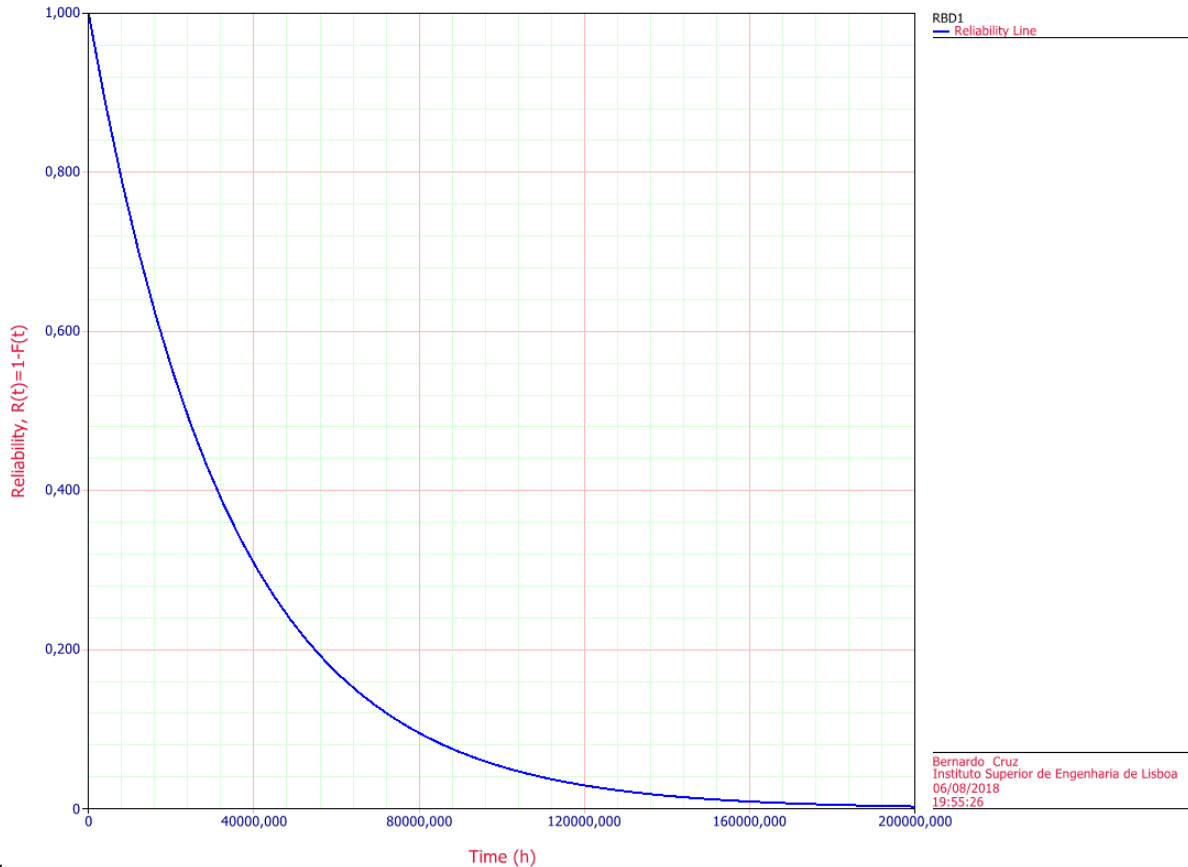


Figura 4.28 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo do disjuntor [RS]

$$R(t=730) = 0,978762; R(t=4380) = 0,879150; R(t=8766) = 0,772768$$

$$t(R=0,05) = 101873,504343 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 3582,911946 \text{ h}; \text{Mean Life} = 33989,918529 \text{ h}$$

#### 4.2.4.5 Cabo Umbilical

Cabo umbilical é um cabo denso que transmite a compressão de um fluido de um local para outro. A melhor forma de monitorização é através de válvulas. As falhas podem ser determinadas pela turbulência, ou danos como corrosão ou sobrecarga ou entupimento devido as aspectos exteriores. O tempo de aquisição é de 72 h com o tempo de reparação de 48 h a taxa de avaria é de 0,04 com MTBF idêntico ao disjuntor como mostra a figura 4.29.

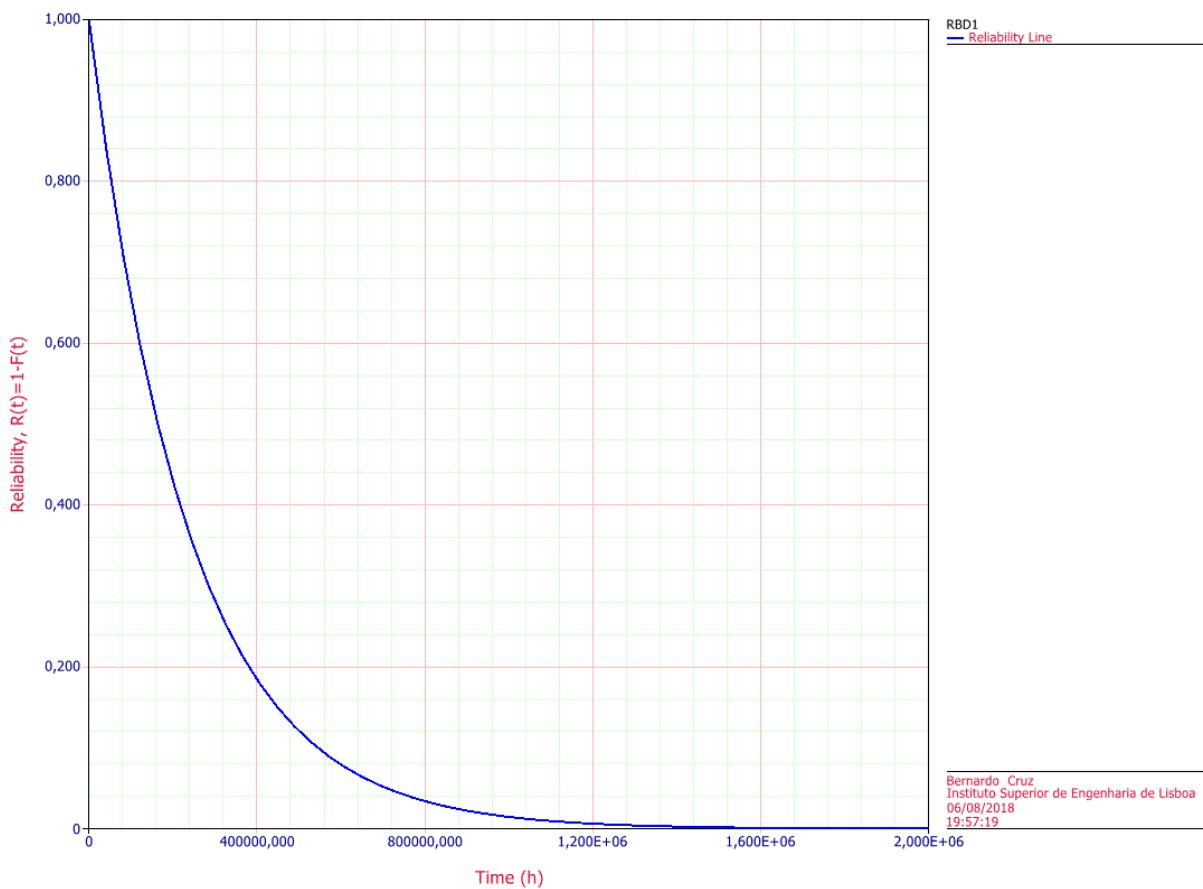


Figura 4.29 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do cabo umbilical [RS]

$$R(t=730) = 0,996921; R(t=4380) = 0,981670; R(t=8766) = 0,963652$$

$$t(R=0,05) = 709259,857276 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 24944,813980 \text{ h}; \text{Mean Life} = 236643,324678 \text{ h}$$

#### 4.2.4.6 Cabo Submarinho

Os cabos submarinhos também que transmitem electricidade e por estarem no fundo do mar tem que ser bem revestidos. as falhas acontecem por motivos naturais ou desgaste e utiliza-se sempre um sistema redundante apesar da taxa de avarias ser 0,09 por ano. O tempo de aquisição é de 5 h com o tempo de reparação de 2 h. Apresenta o MTBF mais alto de todos os componentes com a distribuição representada na figura 4.30

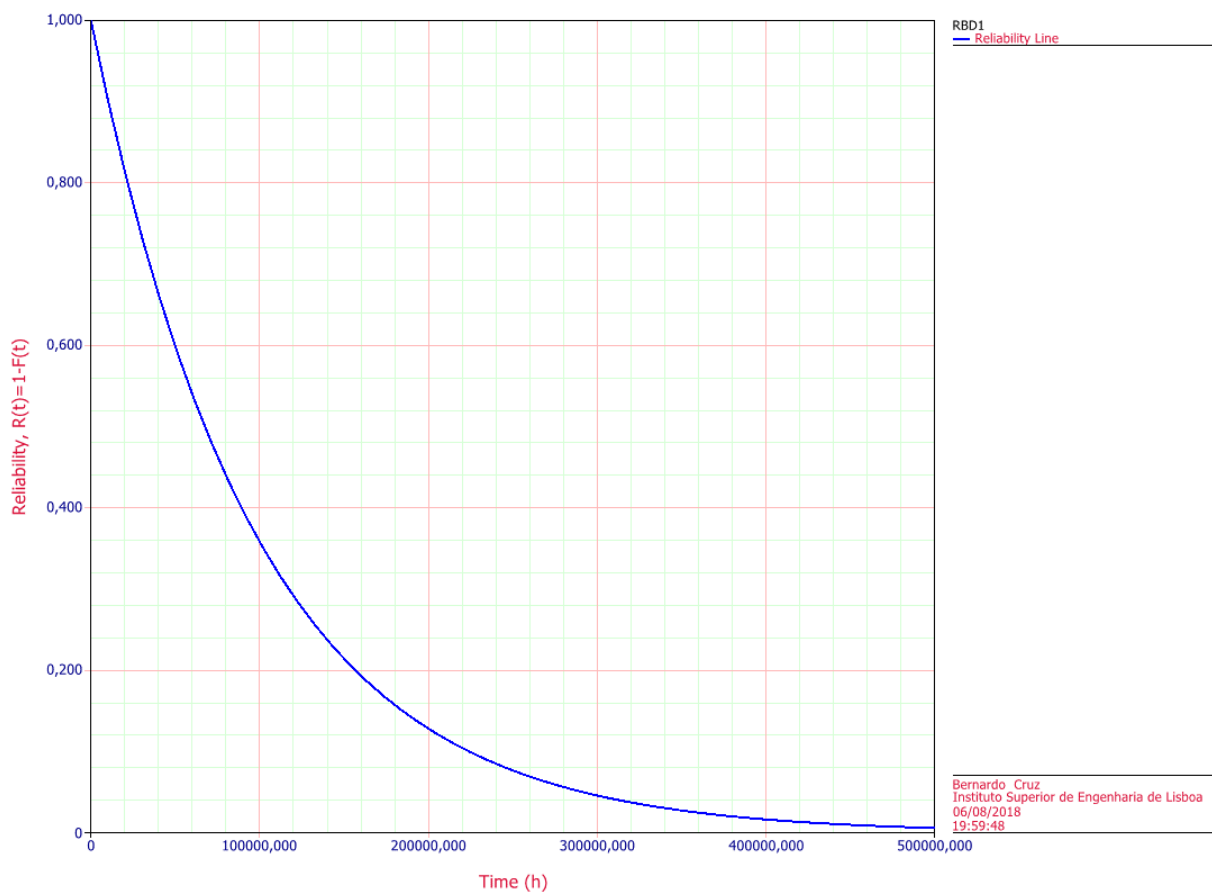


Figura 4.30 - Gráfico de fiabilidade Vs tempo dos cabos submarinhos [RS]

$$R(t=730) = 0,992528; R(t=4380) = 0,955997; R(t=8766) = 0,913875$$

$$t(R=0,05) = 291584,607930 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 10255,090196 \text{ h}; \text{Mean Life} = 97286,700125 \text{ h}$$

#### 4.2.4.7 Análise do subsistema de transmissão elétrica

Podemos verificar através da figura 4.31 que este subsistema contém cinco componentes que se comportam pela ordem indicada. A taxa de avarias decrescente como podemos verificar na figura 4.32 com o MTBF do subsistema superior a 10 anos.

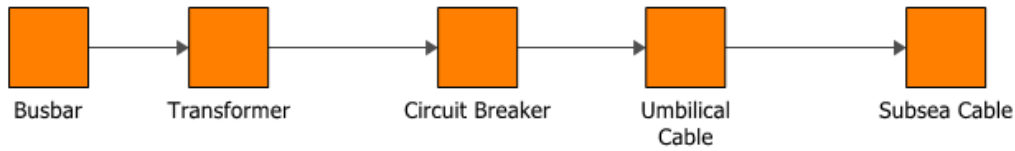


Figura 4.31 - RBD do subsistema transmissão elétrica [RS]



Figura 4.32 – Gráfico de fiabilidade Vs tempo do subsistema transmissão elétrica [RS]

$$R(t=730) = 0,961373; R(t=4380) = 0,789498; R(t=8766) = 0,623105$$

$$t(R=0,05) = 55514,429815 \text{ h}; t(R=0,0001) = 170678,400959 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 1952,453840 \text{ h};$$

$$\text{Mean Life} = 18522,293493 \text{ h}$$

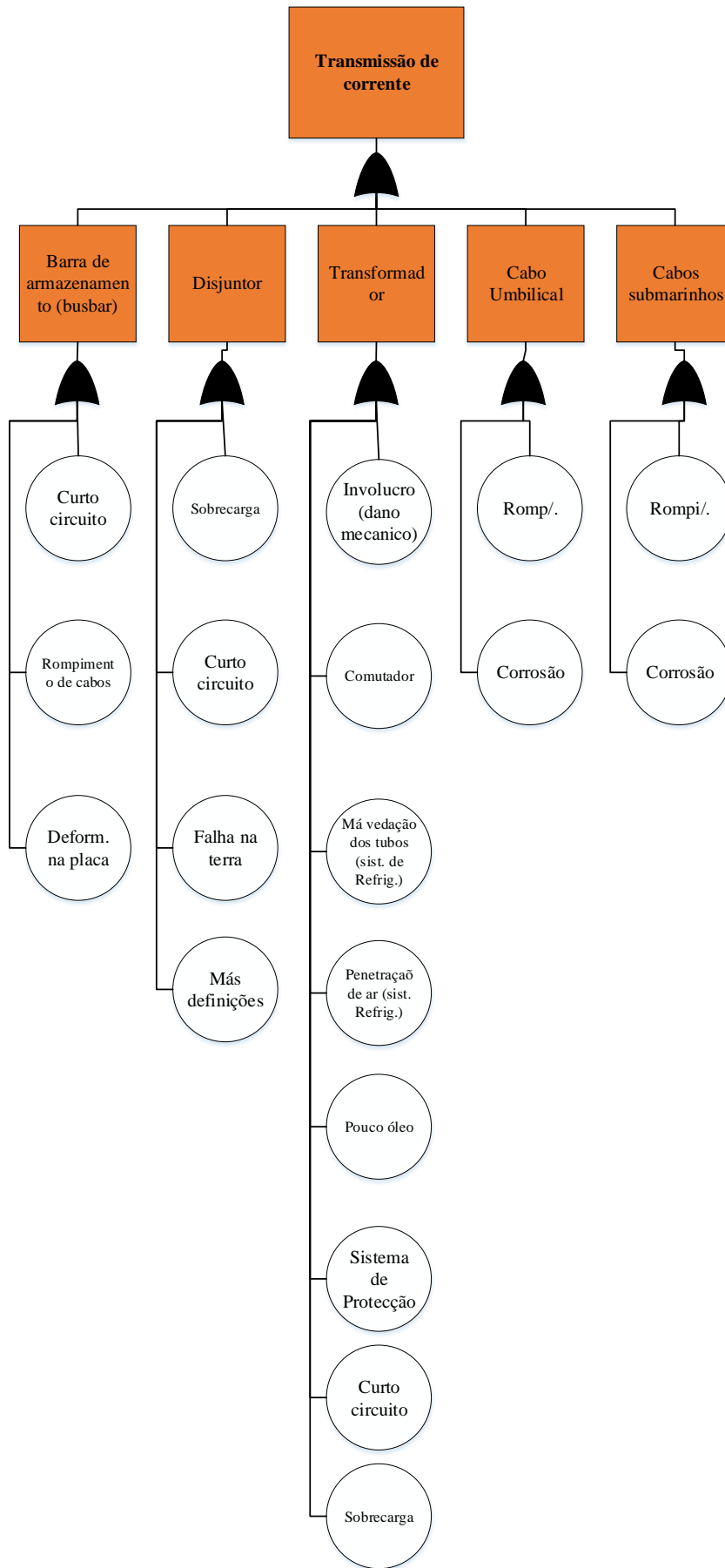
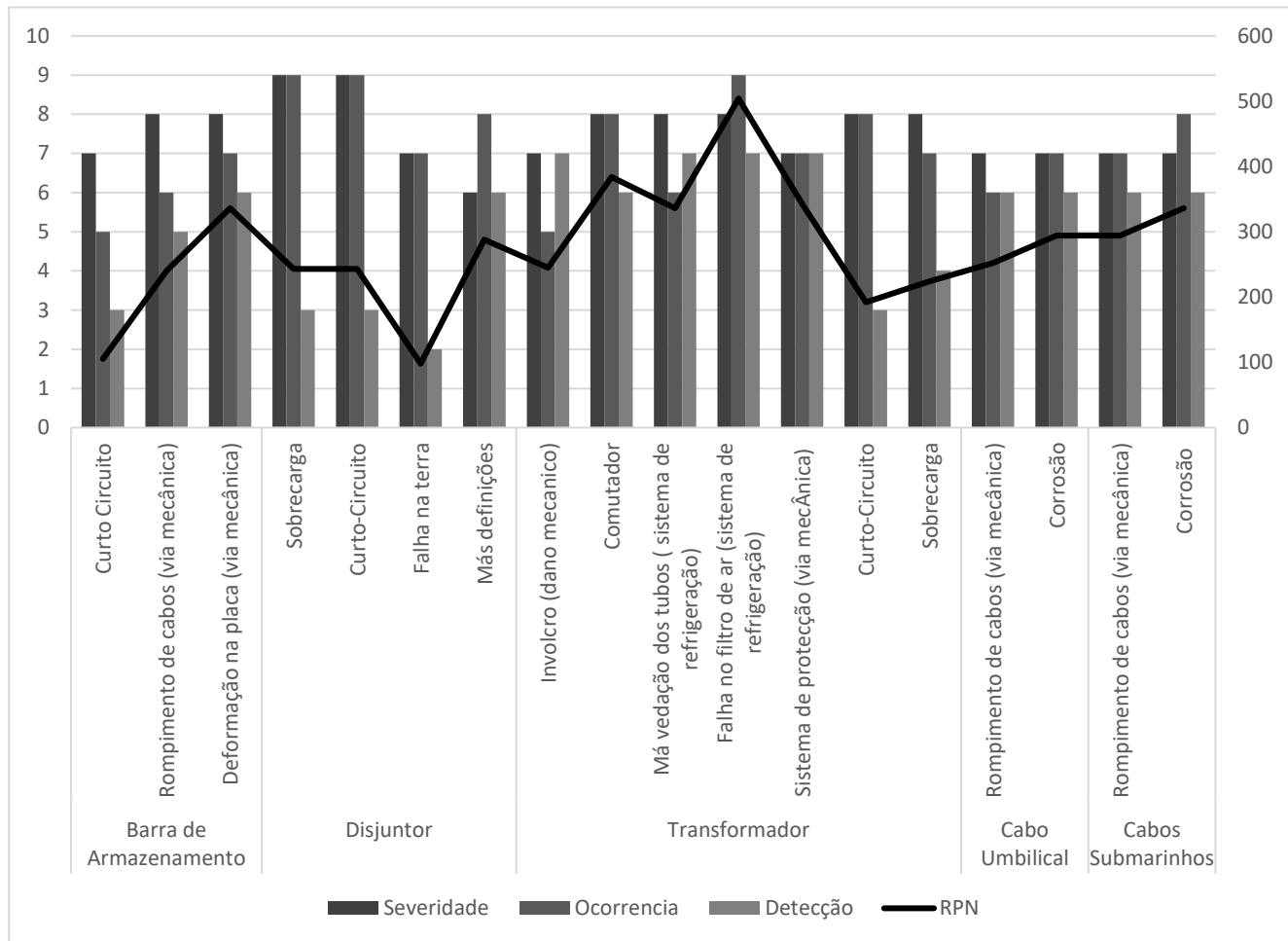


Figura 4.33 - FTA do subsistema de transmissão elétrica

Tabela 4.5 - Gráfico FMEA do subsistema da transmissão eléctrica



Na figura 4.33 podemos verificar a presença de problemas eléctricos destacando sobrealimentação, problemas de cabos e curto-circuito. Através da análise FMEA na tabela 4.5 identificamos a sobrecarga no disjuntor e na falha do filtro de ar que são problemas comuns na transmissão eléctrica. Apesar de ter pouca ocorrência as falhas nos cabos são de extrema importância porque só são detectados quando precisam de manutenção correctiva.

## 4.3 Análise do sistema WEC

No sistema WEC em geral podemos conferir através da figura 4.34 e nos subcapítulos anteriores que é determinado por 4 subsistemas. Este sistema contém 900 h com uma margem de erro fígida como vemos na figura 4.35

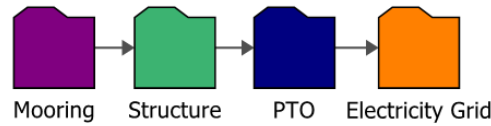


Figura 4.34 - RBD do sistema WEC [RS]

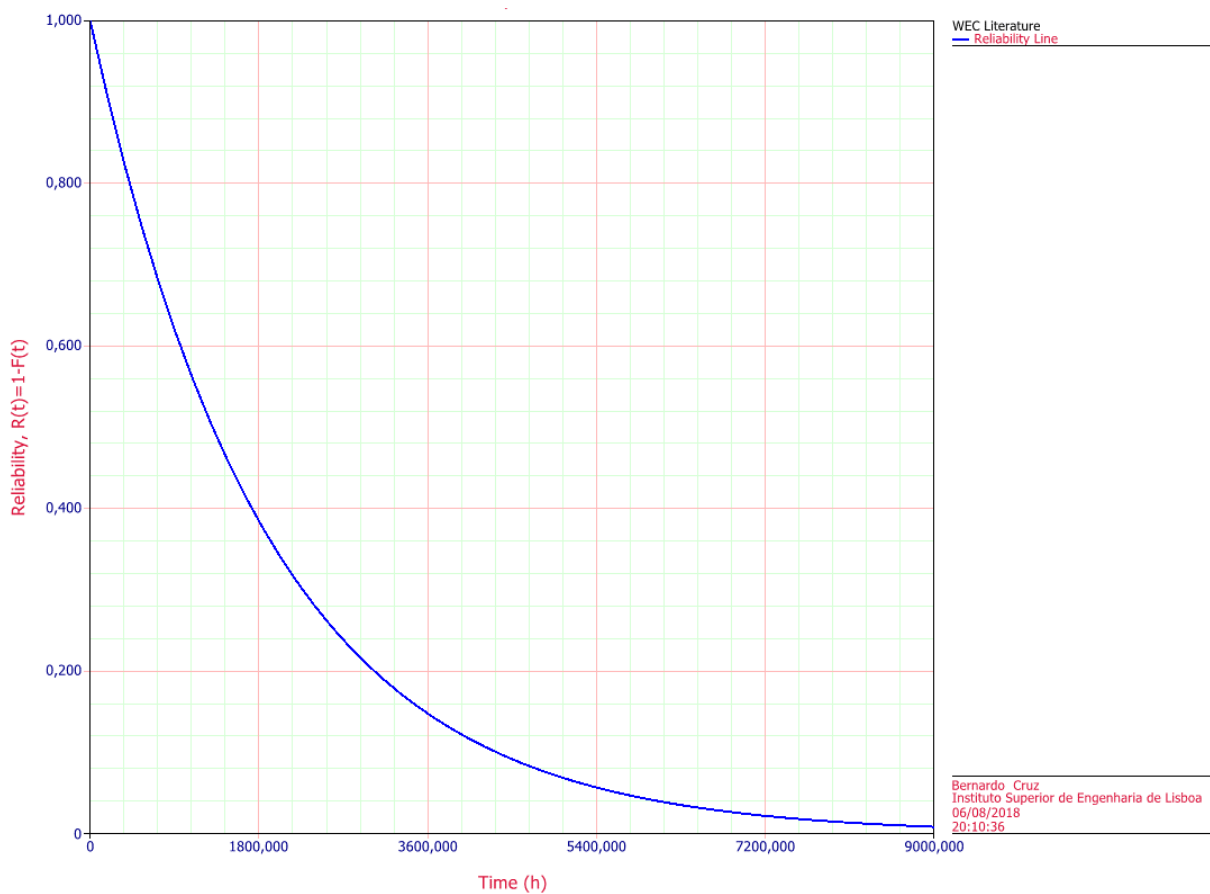


Figura 4.35 - Gráfico Fiabilidade Vs Tempo do sistema WEC [RS]

$$R(t=8766) = 0,009486; R(t=730) = 0,678484; R(t=4380) = 0,097553$$

$$t(R=0,0001) = 17333,475616 \text{ h}; t(R=0,05) = 5637,842927 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 198,284087 \text{ h}; \text{ Mean Life} = 1881,056542 \text{ h}$$



Em toda a sua estrutura podemos analisar face a FMEA anteriormente e analisando o máximo, mínimo e média de todos os subsistemas como vemos na figura 4.36

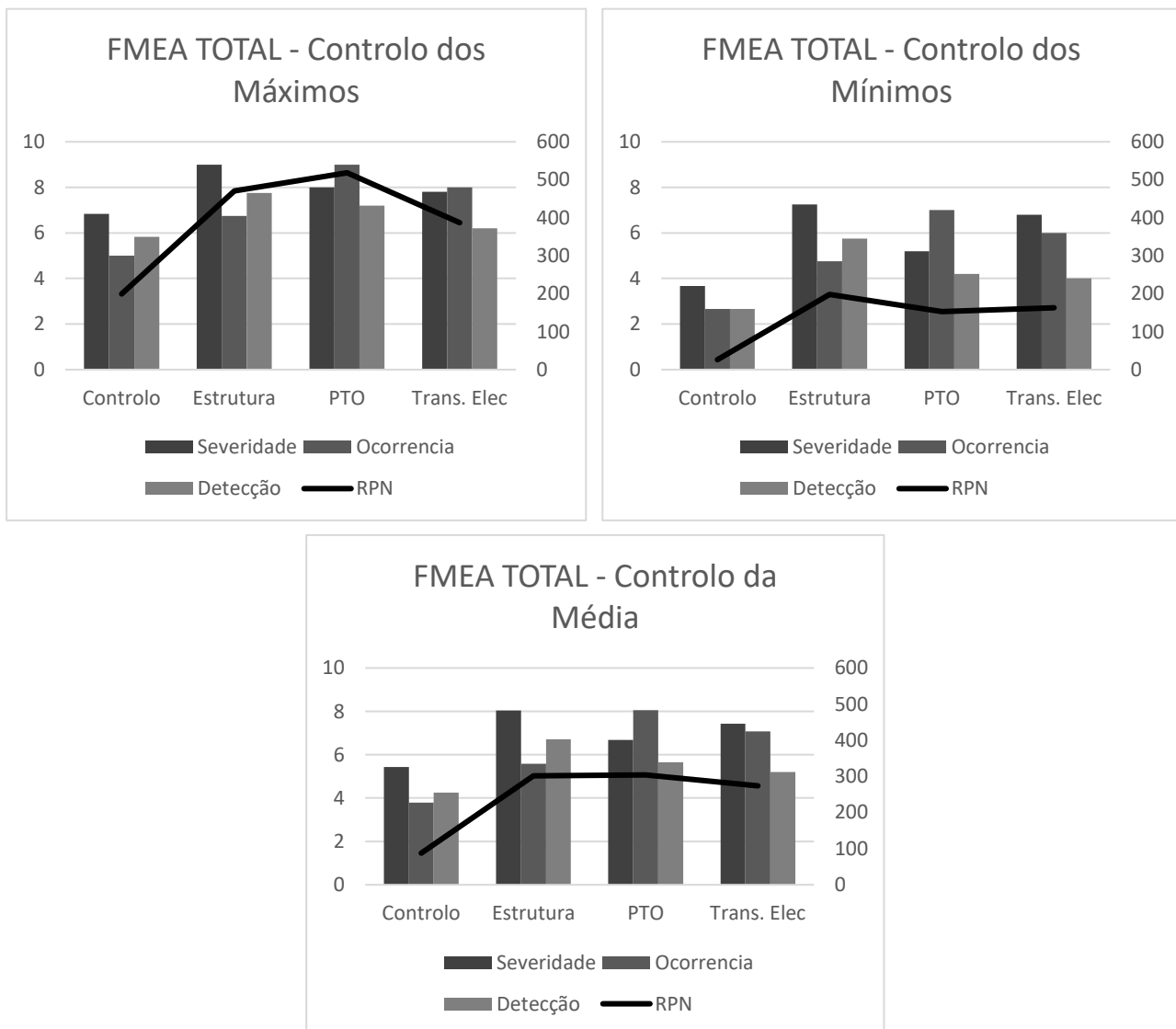


Figura 4.36 - Gráfico de Mínimo, Máximo e Média de cada subsistema

Concluimos que os valores máximos o sistema de controlo não constituem principal atenção (PTO). Nos valores mínimos, existe uma diferença na severidade e posteriormente no risco nos subsistemas estrutura e PTO. Por fim, os valores da média encontram equilibrados com execução do controlo. Apenas conta com a presença da amarração.

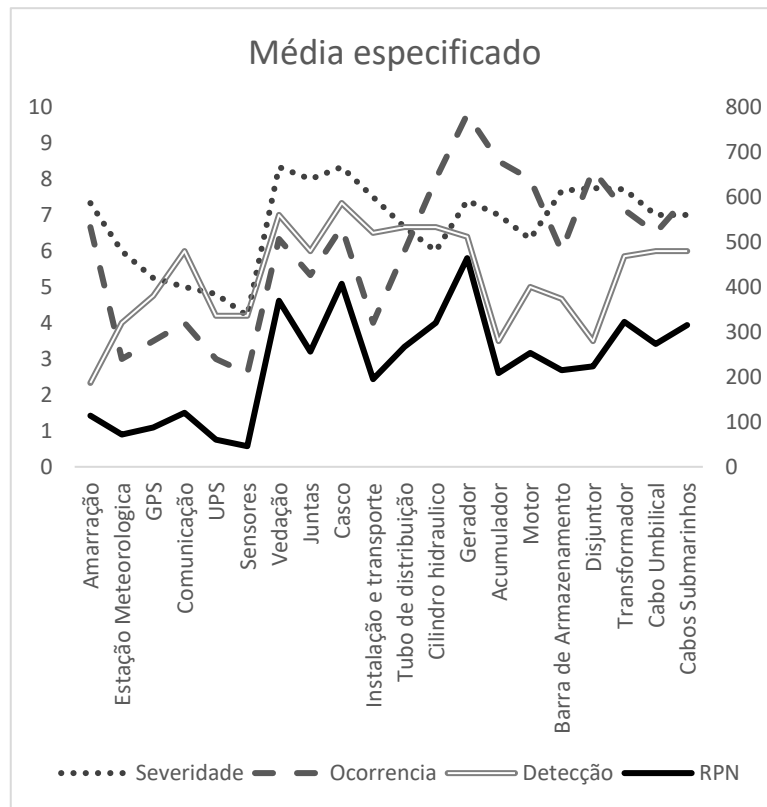
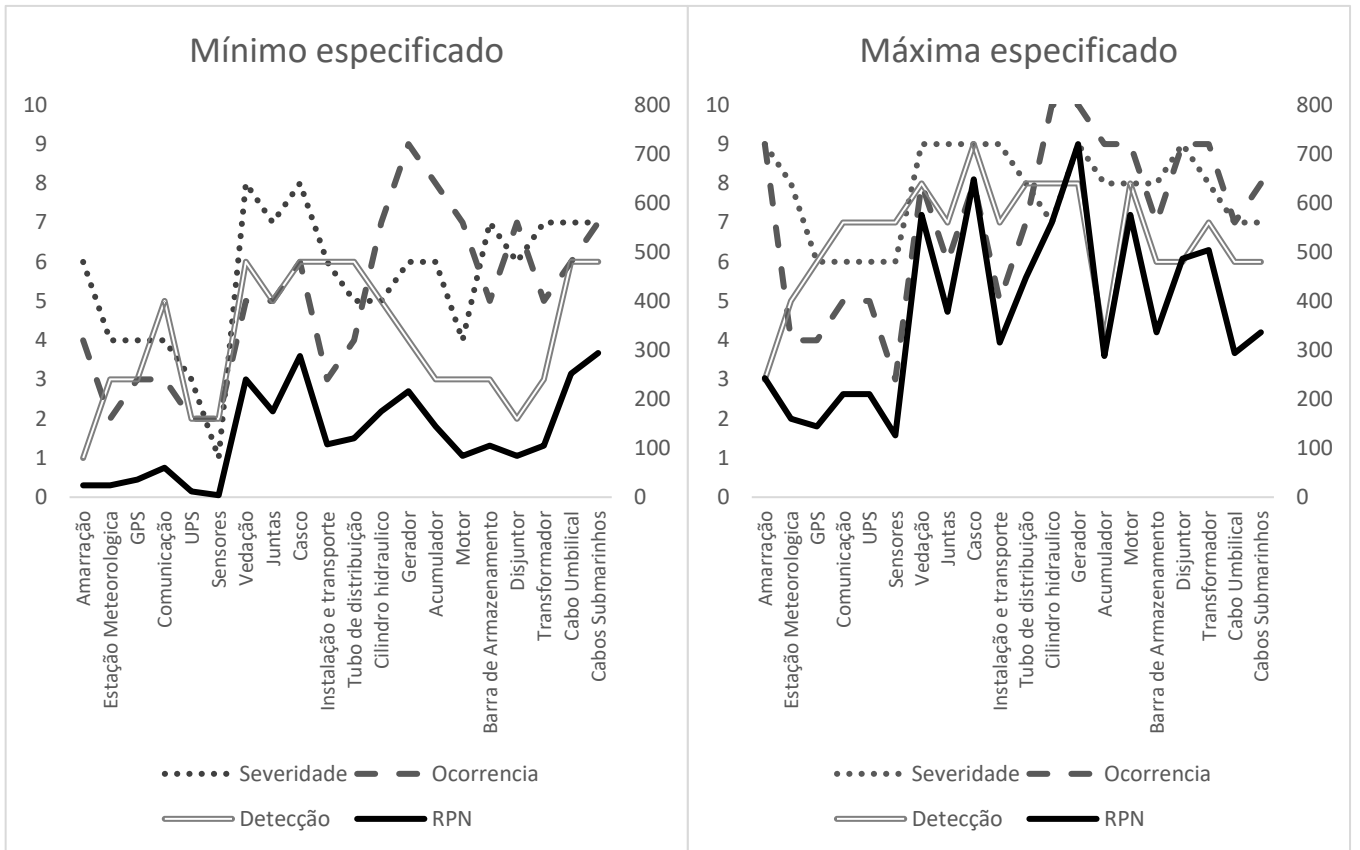


Figura 4.37 - Mínimo, Máximo e Média de cada Componente

Apesar da convergência de valores é importante ter em conta as vedações, risco e gerador nos valores da média e mínimo e motor e cabo umbilical face aos mínimos com valores mais elevados. Como vemos na figura 4.37

---

## 5. Proposta de melhoria e análise de resultados

---

Como vimos o sistema WEC exige uma manutenção elevada e de frequência muito alta. Através dos conhecimentos descritos do capítulo 3, maximizou-se o sistema ao nível do subsistema na secção 5.1. A secção 5.2 contem uma análise comparativa, da proposta face ao sistema descrito no capítulo 4, bem como um quadro para criação de ferramentas de diagnóstico e alternativas de manutenção para cada falha de cada componente organizadas por cada subsistema.

### 5.1. Melhoria dos subsistemas

#### 5.1.1 Subsistema de controlo e sobrevivência

Vamos tentar aproximar os valores das taxas de avarias entre subsistemas para que possamos quando efectuarmos uma manutenção seja a nível geral para minimizar os custos e com isto a nível das amarrações utilizou-se um nó onde 2 das 3 amarrações tem que estar activos como mostra a figura 5.1 o que faz os seguintes resultados:

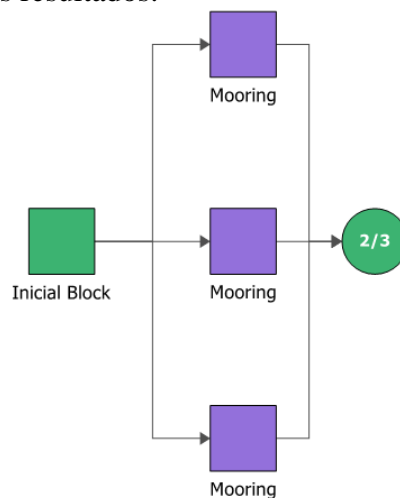


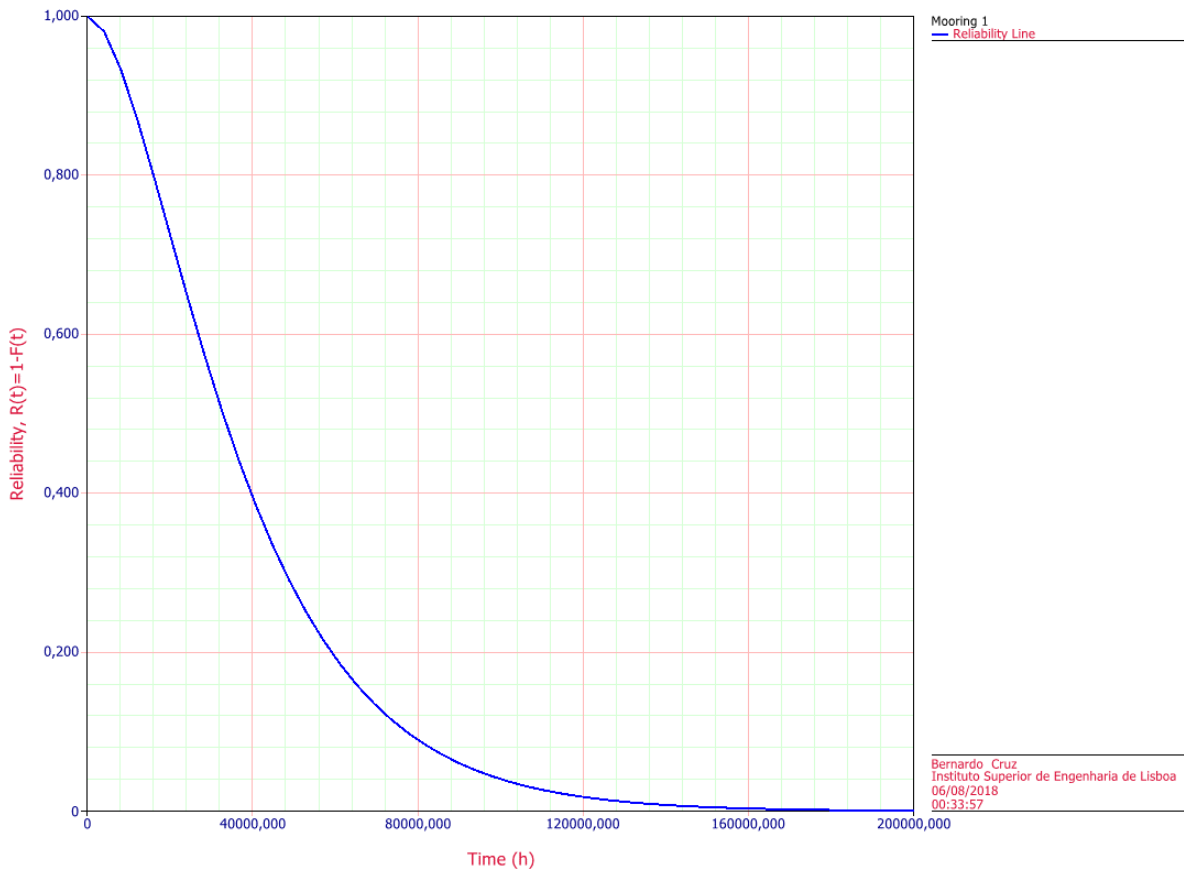
Figura 5.1 - RBD Amarração max [RS]

A fórmula utilizada para o cálculo em vez de ser a multiplicação como no caso tradicional em serie fica:

$$R_{\text{total}}(t) = R(t)^3 + 3R(t)^2 \quad (5.1)$$

$$R(t=730) = 0,999305; R(t=4380) = 0,977962; R(t=8766) = 0,923970$$

$$t(R=0,05) = 94697,427145 \text{ h}; \text{ B10\% Life} = 10318,210618 \text{ h}; \text{ Mean Life} = 39446,114788 \text{ h}$$



*Figura 5.2 Sistema maximizado do subsistema das amarrações [RS]*

Obteve-se o novo valor para o MTBF aproximado de 200000 horas. Os valores são significativamente diferentes no início da curvatura causados pela equação 5.1 referentes a soma da segunda parcela da equação.

*Tabela 5.1 - Comparação de resultados do sistema das amarrações*

<b>Amarração</b>	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
R(t=730)	0,954803	0,999305	0,044502
R(t=4380)	0,757676	0,977962	0,220286
R(t=8766)	0,573854	0,92397	0,350116
t(R=0,05)	47283,99048	94697,42715	47413,43667
t(R=0,0001)	145374,021	243979,9393	98605,91828
B10& Life	1662,987604	10318,21062	8655,223014
Mean Life	15776,22164	39446,11479	23669,89315

Retirando os valores e analisando na tabela 5.1, nota-se uma grande diferença na fiabilidade com um ano de vida. O MTBF cresce quase 60% e ao final do primeiro mês o aumento para quase fiabilidade de quase 99,93 %. Mas existe uma condição importante necessária a ter em conta que é quando apenas estão a funcionar duas das três amarrações a energia retirada pelo sistema WEC não é maximizada, portanto quando isso acontece há que tomar medidas necessárias. Conseguimos retirar a informação de má posicionamento através das coordenadas do GPS ou camaras nas amarrações.

Esta alteração logística apresenta os mesmos custos de O&M, apenas é considerado mau funcionamento quando apenas duas das três amarrações funcionam o que não tenha grande representatividade nas actividades de manutenção preventiva. A margem de erro constitui uma grande probabilidade de rotura de todo o sistema WEC.

### 5.1.2 Subsistema da estrutura

No subsistema da estrutura utilizou-se sistemas de redundância 1 na junta e 4 nas vedações, como podemos verificar na figura 5.3. O ideal seria submeter um material anti-corrosivo com maiores propriedades como plásticos ou compostos pois as redundâncias na parte da estrutura aumentam significativamente o peso do sistema WEC. A fiabilidade passa a ser calculada através da equação 5.2

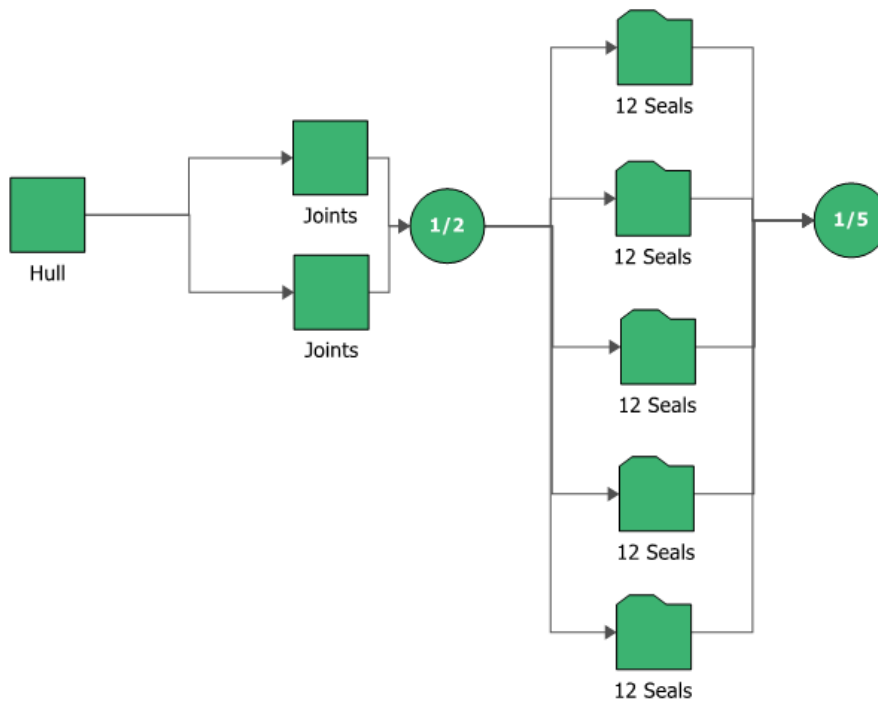


Figura 5.3 - RBD do subsistema estrutural [RS]

$$R_{Estrutura}(t) = R_{Hull}(t) \times (R_{Juntas}^2(t) + 2 \cdot R_{Juntas}(t)) \times (R_{12seals}^5(t) + 5 \cdot R_{12seals}^4(t) + 3 \cdot R_{12seals}^3(t) + 2 \cdot R_{12seals}^2(t) + R_{12seals}(t)) \quad (5.2)$$

$$R(t=730) = 0,999193; R(t=4380) = 0,971544; R(t=8766) = 0,859918$$

$$t(R=0,05) = 37360,348286 \text{ h}; t(R=0,0001) = 83897,793021 \text{ h}; B10\% \text{ Life} = 7566,521820 \text{ h};$$

$$\text{Mean Life} = 18612,172524 \text{ h}$$

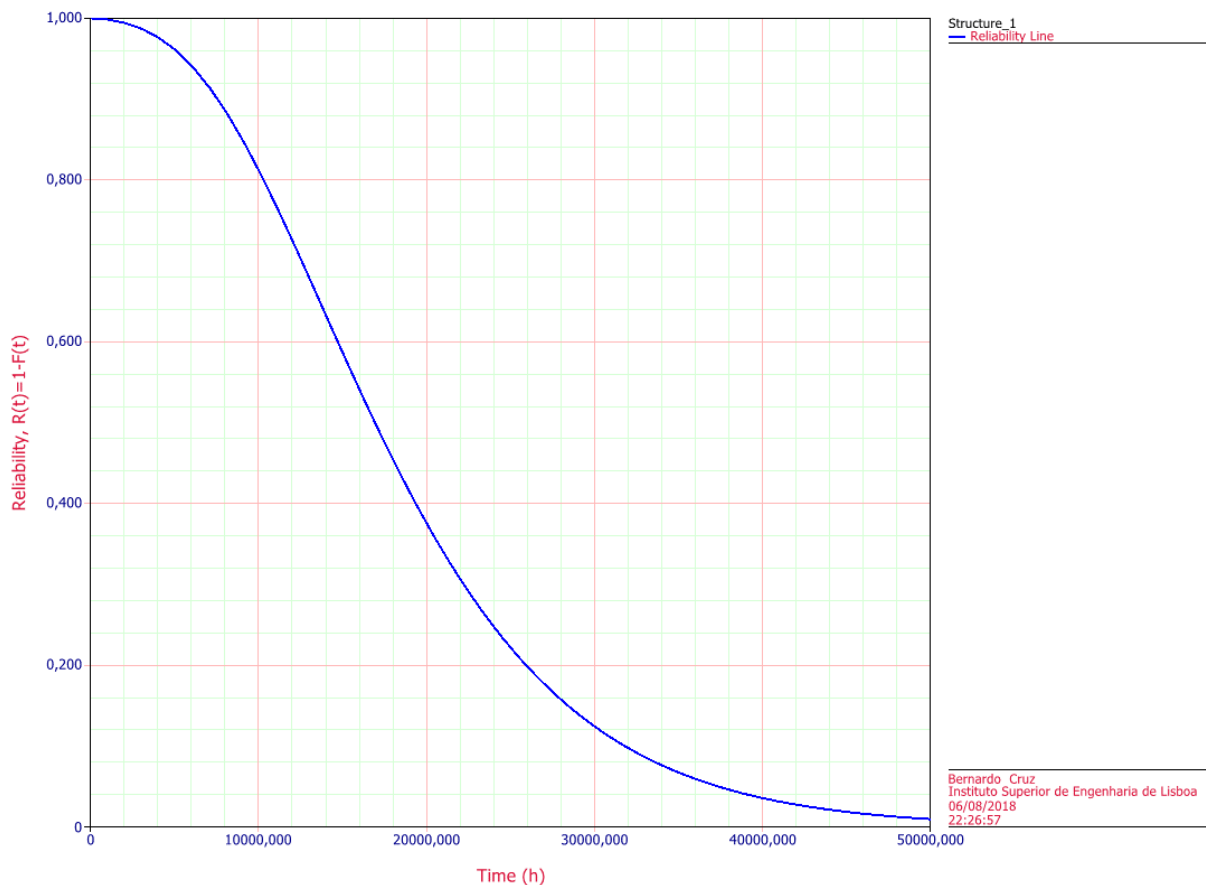


Figura 5.4 - Maximização do subsistema estrutural [RS]

Tabela 5.2 - Análise da comparação do subsistema estrutural

Estrutura	Classico	Maximizado	Diferença
R(t=730)	0,90486	0,999193	0,094333
R(t=4380)	0,548894	0,971544	0,42265
R(t=8766)	0,301037	0,859918	0,558881
t(R=0,05)	21874,32791	37360,34829	15486,02038
t(R=0,0001)	67252,34001	83897,79302	16645,45301
B10& Life	769,324578	7566,52182	6797,197242
Mean Life	7298,331674	18612,17252	11313,84085

Podemos concluir que a diferença da fiabilidade se aproxima dos 60% e que o tempo de vida útil aumenta 80%, verificado na tabela 5.2. Porém cada sistema tem estruturas e formas diferentes e sendo um absorvedor pontual é necessário fazer um estudo mais pormenorizado neste subsistema. A estrutura nomeadamente as vedações constituem uma grande importância pois se por condições adversas não selar bem pode contaminar e por fim destruir todos os restantes subsistemas que lá dentro se encontram. A figura 5.4 identifica o comportamento das avarias no tempo.

### 5.1.3 Subsistema Power Take Off

No caso do PTO utilizou-se uma redundância no acumulador, e quatro nos geradores (figura 5.5). É habitual usar cerca de 10 acumuladores o que na fiabilidade do sistema em questão não existiria diferença pois apresentam uma taxa de avarias muito baixa. Contudo os geradores apresentam a criticidade do subsistema é necessário investir em sensores e um algoritmo que permita alternar o gerador online quando este não se encontra nas condições de serviço necessárias.

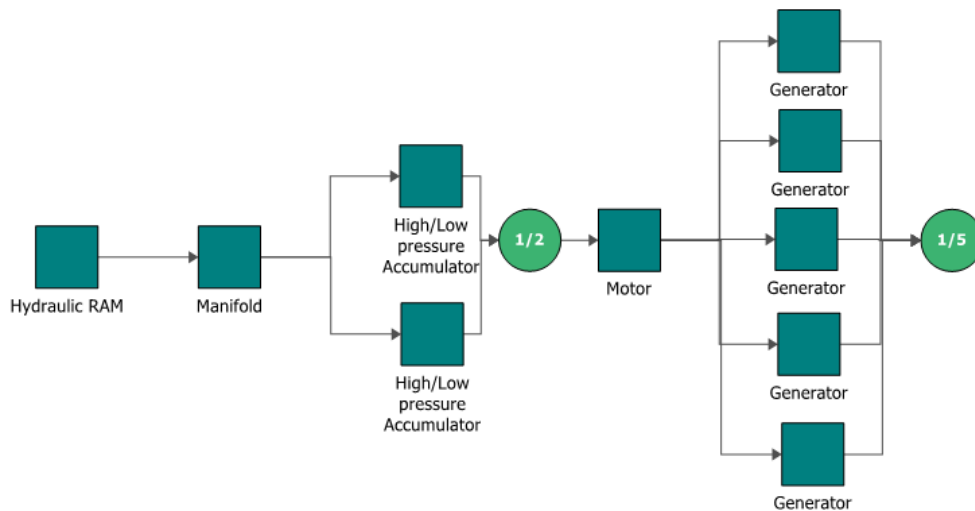


Figura 5.5 - RBD do subsistema PTO maximizado [RS]

$$R_{PTO}(t) = R_{HydraulicRam}(t) \times R_{Manifold}(t) \times (R_{acum}^2(t) + 2 \cdot R_{acum}(t)) \times R_{Motor} \times (R_{gen}^5(t) + 5 \cdot R_{gen}^4(t) + 3 \cdot R_{gen}^3(t) + 2 \cdot R_{gen}^2(t)) \quad (5.3)$$

$$R(t=8766) = 0,394821; R(t=730) = 0,964529; R(t=4380) = 0,743278$$

$$t(R=0,0001) = 41287,694955 \text{ h}; t(R=0,05) = 17990,138100 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 1979,149849 \text{ h}; \text{Mean Life} = 8163,448466 \text{ h}$$

Pela equação 5.3 os valores obtidos conferem um aumento significativo no subsistema visíveis na tabela 5.3 no início do ciclo de vida útil tal como MTBF de mais 188 dias.



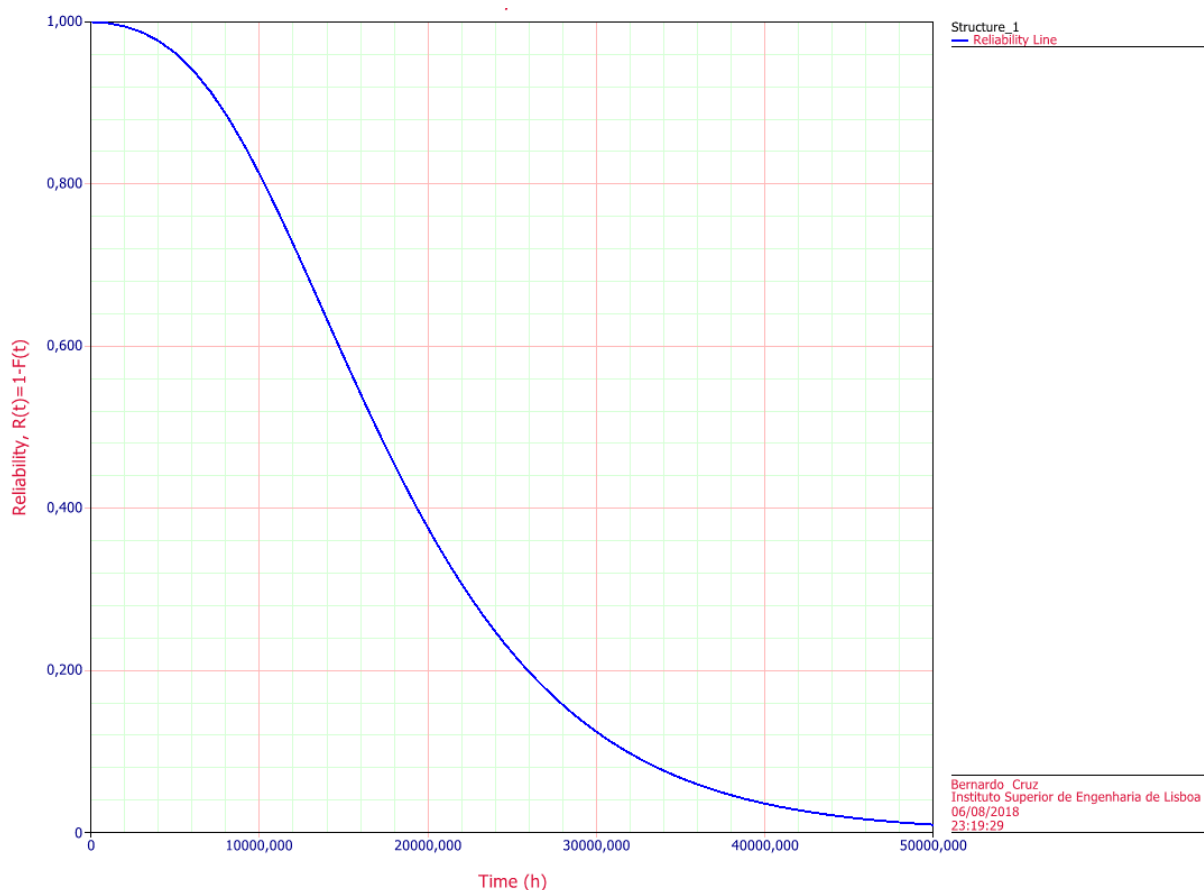


Figura 5.6 - Gráfico do subsistema PTO maximizado [RS]

Tabela 5.3 - Análise da comparação do subsistema PTO

PTO	Classico	Maximizado	Diferença
R(t=730)	0,81687	0,964529	0,147659
R(t=4380)	0,297109	0,743278	0,446169
R(t=8766)	0,088127	0,394821	0,306694
t(R=0,05)	10811,39867	17990,1381	7178,739426
t(R=0,0001)	33239,50627	41287,69496	8048,188687
B10& Life	380,239099	1979,149849	1598,91075
Mean Life	3607,204469	8163,448466	4556,243997

Com as medidas tomadas a fiabilidade aumentou 30% ao final de um ano, o que nesta fase de vida já se encontrava com 92,22 % de probabilidade de falha. E o tempo de vida aumentou mais 190 dias o que pode significar uma margem de erro importante para a administração da manutenção preventiva ou das falhas em cadeia que foram desprezadas.

### 5.1.4 Subsistema de transmissão eléctrica

Por último no sistema de transmissão eléctrica, apenas 3 redundancias nos disjuntores para nivelar a taxa de avarias como mostra a figura 5.7 ficando assim o cabo submarino com a taxa de avarias maior calculado através da equação 5.4.

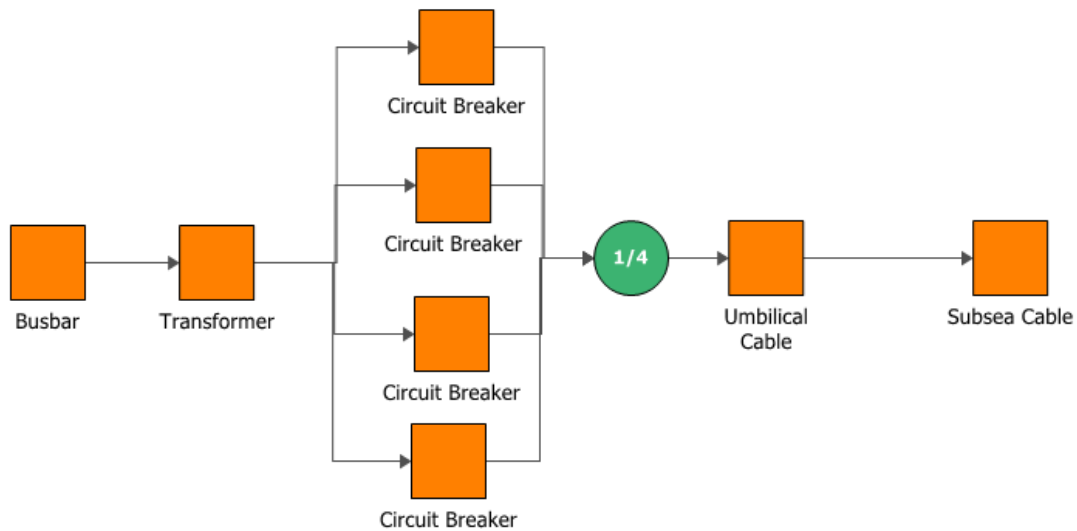


Figura 5.7 - RBD do subsistema de transmissão eléctrica [RS]

$$R_{TransElect}(t) = R_{Busbar}(t) \times R_{Transf.}(t) \times (R_{Circbreak}^4(t) + 4 \cdot R_{Circbreak}^3(t) + 3 \cdot R_{Circbreak}^2(t) + 2 \cdot R_{Circbreak}(t)) \times R_{Umbilic}(t) \times R_{Subsea}(t) \quad (5.4)$$

$$R(t=730) = 0,982233; R(t=4380) = 0,897832; R(t=8766) = 0,804179$$

$$t(R=0,05) = 78412,938938 \text{ h}; t(R=0,0001) = 196281,485823 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 4282,510074 \text{ h}; \text{Mean Life} = 30580,846182 \text{ h}$$

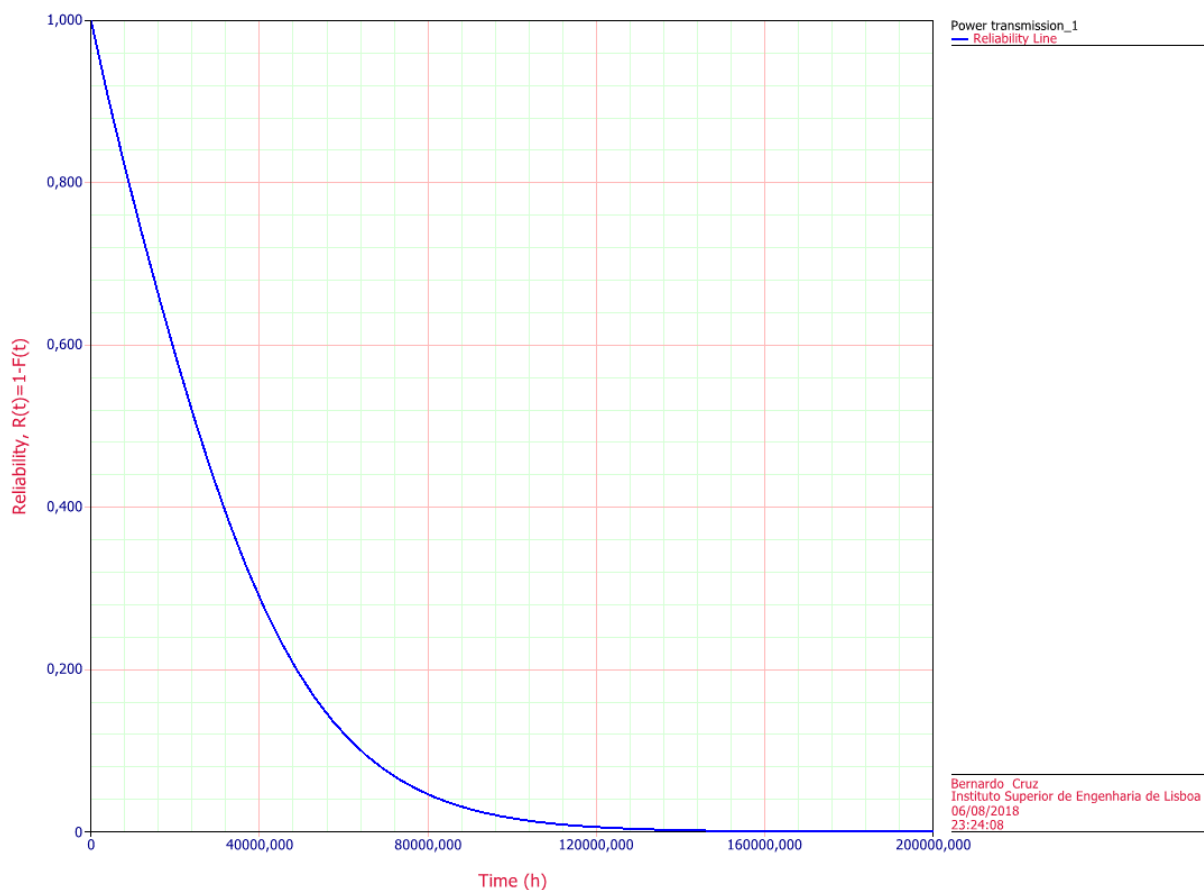


Figura 5.8 - Análise do subsistema de transmissão eléctrica maximizado [RS]

No gráfico 5.8 podemos verificar um declive acentuado, mas prolongado no final de vida, conferindo uma estabilidade maior no ciclo de vida útil.

Tabela 5.4 - Comparação dos dados do subsistema trans- Electr.

Trans. Elect	Classico	Maximizado	Diferença
R(t=730)	0,961373	0,982233	0,02086
R(t=4380)	0,789498	0,897832	0,108334
R(t=8766)	0,623105	0,804179	0,181074
t(R=0,05)	55514,42982	78412,93894	22898,50912
t(R=0,0001)	170678,401	196281,4858	25603,08486
B10& Life	1952,45384	4282,510074	2330,056234
Mean Life	18522,29349	30580,84618	12058,55269

Na comparação de resultados obtidos (tabela 5.4) podemos retirar uma diferença acentuada logo nos 6 meses de vida e num ano de vida de 10 e 18 por cento de fiabilidade e um aumento de tempo de vida de 1 ano e 4 meses. O tempo de vida fica então em 3,4 anos. Com a manutenção preventiva pode ser agendada na altura em que os outros subsistemas precisarem de intervenção.

## 5.2 Análise e comparação dos resultados obtidos

Aproveitando e mantendo a ordem imposta pelo o sistema principal (figura 5.9). Os valores novos obtidos pelo *software* garantem um aumento significativo dos valores de fiabilidade em todo o espectro temporal.

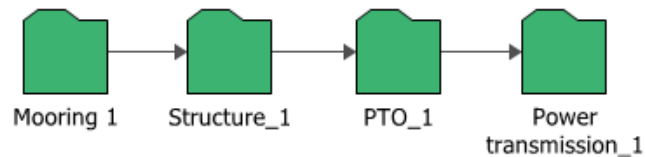


Figura 5.9 - RBD do sistema maximizado [RS]

$$R(t=730) = 0,945970; R(t=4380) = 0,634061; R(t=8766) = 0,252271$$

$$t(R=0,0001) = 28924,423475 \text{ h}; t(R=0,05) = 13927,990566 \text{ h}$$

$$B10\% \text{ Life} = 1330,585652 \text{ h}; \text{Mean Life} = 6313,104011 \text{ h}$$

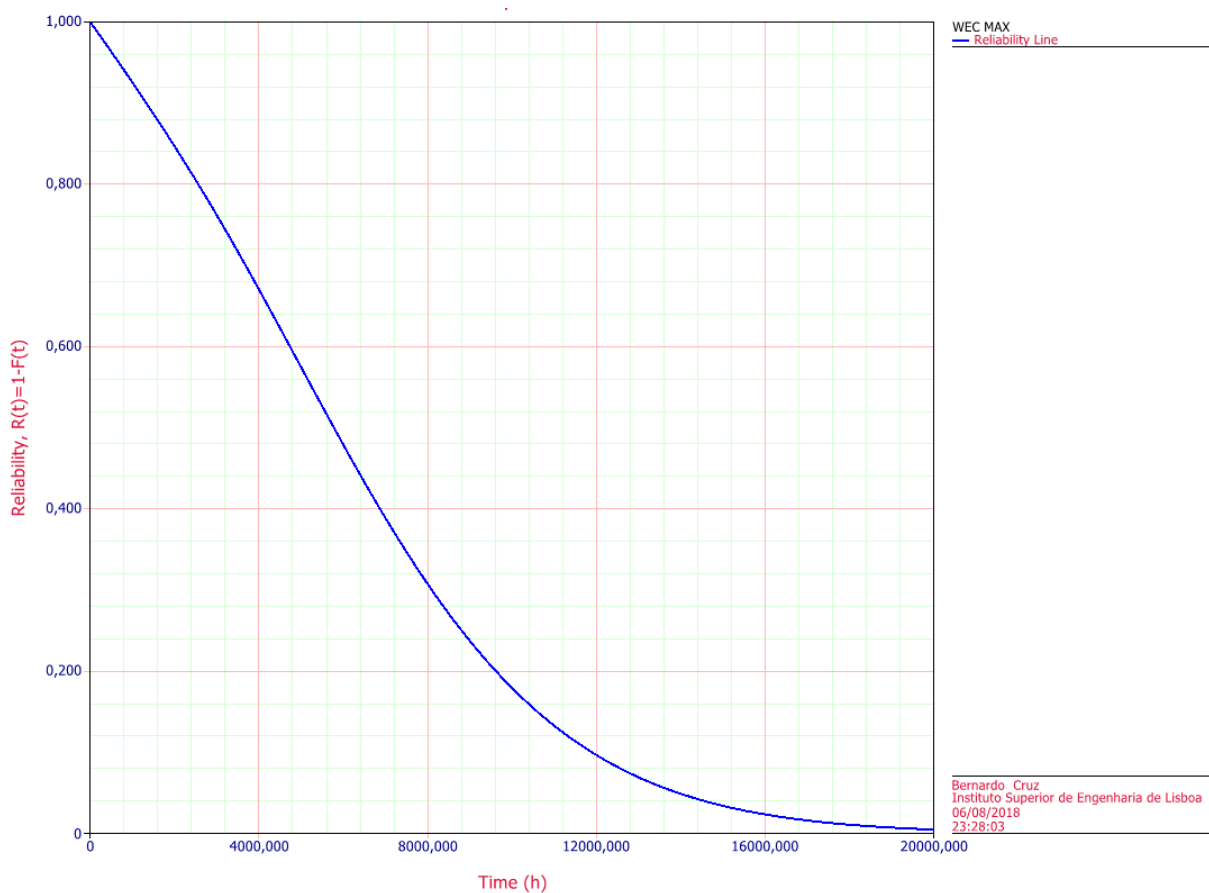


Figura 5.10 - Análise do sistema maximizado [RS]

Tabela 5.5 - Comparação dos estados de fiabilidade

1 mês	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
Amarração	0,954803	0,999305	0,044502
Estrutura	0,90486	0,999193	0,094333
PTO	0,81687	0,964529	0,147659
Trans. Elect	0,961373	0,982233	0,02086
<b>TOTAL</b>	0,678484	0,94597	0,267486
6 meses	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
Amarração	0,757676	0,977962	0,220286
Estrutura	0,548894	0,971544	0,42265
PTO	0,297109	0,743278	0,446169
Trans. Elect	0,789498	0,897832	0,108334
<b>TOTAL</b>	0,097553	0,634061	0,536508
1 ano	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
Amarração	0,573854	0,92397	0,350116
Estrutura	0,301037	0,859918	0,558881
PTO	0,088127	0,394821	0,306694
Trans. Elect	0,623105	0,804179	0,181074
<b>TOTAL</b>	0,009486	0,252271	0,242785

Na tabela 5.5 podemos verificar a pouca diferença nalguns subsistemas no conjunto a diferença está nos 26% de fiabilidade ao final do primeiro mês causado pela maximização do PTO. Ao final de meio ano a diferença é de 53% com as mesmas causas anteriores, mas ao final de um ano esta diferença reduz para os 24% e o maior aumento encontra-se nas amarrações.

Tabela 5.6 - Comparação dos dados de vida util com margem de erros diferentes

t(R=0,05)	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
Amarração	47283,99048	94697,42715	47413,43667
Estrutura	21874,32791	37360,34829	15486,02038
PTO	10811,39867	17990,1381	7178,739426
Trans. Elect	55514,42982	78412,93894	22898,50912
<b>TOTAL</b>	5637,842927	13927,99057	8290,147639
t(R=0,0001)	<b>Classico</b>	<b>Maximizado</b>	<b>Diferença</b>
Amarração	145374,021	243979,9393	98605,91828
Estrutura	67252,34001	83897,79302	16645,45301
PTO	33239,50627	41287,69496	8048,188687
Trans. Elect	170678,401	196281,4858	25603,08486
<b>TOTAL</b>	17333,47562	28924,42348	11590,94786

B10& Life	Classico	Maximizado	Diferença
Amarração	1662,987604	10318,21062	8655,223014
Estrutura	769,324578	7566,52182	6797,197242
PTO	380,239099	1979,149849	1598,91075
Trans. Elect	1952,45384	4282,510074	2330,056234
<b>TOTAL</b>	198,284087	1330,585652	1132,301565
Mean Life	Classico	Maximizado	Diferença
Amarração	15776,22164	39446,11479	23669,89315
Estrutura	7298,331674	18612,17252	11313,84085
PTO	3607,204469	8163,448466	4556,243997
Trans. Elect	18522,29349	30580,84618	12058,55269
<b>TOTAL</b>	1881,056542	6313,104011	4432,047469

Podemos observar (tabela 5.6) que o ciclo de intervenção necessária se encontra nos 8 meses devido as falhas existentes no PTO e Estrutura. Na análise dos diferentes valores é importante estabelecer a margem de erro para o projecto de fiabilidade o que comprova que os 10% apesar de mais justa pode apresentar segurança no MTBF. O *meanlife* aponta as manutenções preventivas para cada subsistema ao seja, quatro anos e meio amarração, dois anos para a estrutura, PTO menos de um ano, e transmissão eléctrica 3 anos e meio.

É importante destacar a relevância dos sensores ao estarem avariados ou terem leituras não fidedignas e, porém, necessário usar visitas periódicas com uma margem de 10% do ciclo de vida de um componente que tenha a taxa de avarias por ano menor. Esta visita é realizada de barco com uma tripulação necessária para a realização desse transporte com equipamentos de kit de substituição e ferramentas necessárias para a auditoria, mas também prevenidos para causas maiores. A equipa deverá ter competências transversais nas áreas da Engenharia Mecânica, Electronica e Informática e um ou dois técnicos de manutenção.

Como todos os sistemas se encontram em fase embrionária é necessário que estes custos façam parte do CAPEX fora o investimento inicial. O ideal seria ter uma metodologia que abordasse em simultâneo todos os conceitos de *fault detetion, isolation, recovery and tolerance design*, no entanto é apresentado uma tabela com algumas propostas de ferramentas ao diagnóstico de falhas e manutenção.

Tabela 5.7 - FDIRTD de todas as falhas

<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Deteccção</b>	<b>Manutenção</b>
<b>Amarração</b>	Fadiga na boia	Camara, GPS	Substituição.
	Corrosão	Camara	Substituição.
	Desancoragem (via mecânica)	GPS, Estação Meteorologica	Ancoragem num solo mais sólido.
<b>Estação Meteorologica</b>	Fadiga	Camara	Substituição.
	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
	Falha nos sensores	Valores dado por Sensores	Substituição.
	Falha no software	Valores dado por Sensores	Programação
<b>GPS</b>	Mau Balanceamento	Valores dado por Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Falha nos sensores	Valores dado por Sensores	Substituição.
	Falha no Software	Valores dado por Sensores	Programação
	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
<b>Comunicação</b>	Mau Balanceamento	Valores dado por Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Falha no Software	Valores dado por Sensores	Programação
<b>UPS</b>	Mau Balanceamento	Valores dado por Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Sobreaquecimento	Valores dado por Sensores	Mudança do Sistema de Refrigeração
	Contaminação	Camara	Limpeza ou substituição.
	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
	Falha no Software	Valores dado por Sensores	Programação
<b>Sensores</b>	Mau Balanceamento	Valores dado por Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Sobreaquecimento	Valores dado por Sensores	Mudança do Sistema de Refrigeração
	Contaminação	Valores dado por Sensores	Limpeza ou substituição.
	corrosão	Valores dado por Sensores	Limpeza ou substituição.
	Falha no software	Valores dado por Sensores	Programação
<b>Vedação</b>	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
	Fadiga/ Desgaste	Camara	Substituição.
	Dano (via Mecânico)	Camara e Estação Meteorologica	Substituição.
<b>Juntas</b>	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
	Fadiga/ Desgaste	Camara	Substituição.
	Dano (via Mecânico)	Camara e Estação Meteorologica	Substituição.
<b>Casco</b>	Corrosão	Camara	Limpeza ou substituição.
	Fadiga/ Desgaste	Camara	Substituição.
	Dano (via Mecânico)	Camara e Estação Meteorologica	Substituição.
<b>Instalação e transporte</b>	Mau balanceamento	x	Reprogramação ou redimensionamento
	Má projecção	x	Substituição.
<b>Tubo de distribuição</b>	Entupimento	Sensores	Limpeza ou substituição.
	Mau balanceamento	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Falha no filtro de ar	Sensores	Limpeza ou substituição.
	Corrosão	Sensores	Limpeza ou substituição.

<b>Cilindro hidráulico</b>	Desgaste	Sensores	Substituição.
	Limites de trabalhos baixo	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
<b>Gerador</b>	Corrosão	Sensores	Limpeza ou substituição.
	Sobreaquecimento	Sensores	Mudança do Sistema de Refrigeração
	Carbonização	Sensores	Substituição.
	Fuga de óleo	Sensores	Limpeza e reparação do circuito do óleo.
	Fadiga / Desgaste	Sensores	Substituição.
<b>Acumulador</b>	Pressão na precarga (alta ou baixa)	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Precarregamento acelerado	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
<b>Motor</b>	Sobrecarga	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Curto-circuito	Sensores	Substituição.
	Vibrações	Sensores	Substituição de apoios antivibrantes e balísticos.
<b>Barra de Armazenamento</b>	Curto Circuito	Sensores	Substituição.
	Rompimento de cabos (via mecânica)	Sensores	Substituição.
	Deformação na placa (via mecânica)	Sensores	Substituição.
<b>Disjuntor</b>	Sobrecarga	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Curto-Circuito	Sensores	Substituição.
	Falha na terra	Sensores	Substituição
	Más definições	Sensores	Programação
<b>Transformador</b>	Involcro (dano mecânico)	Camara	Substituição
	Comutador	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Má vedação dos tubos (sistema de refrigeração)	Sensores	Substituição.
	Falha no filtro de ar (sistema de refrigeração)	Sensores	Substituição.
	Sistema de protecção (via mecânica)	Sensores	Substituição.
	Curto-Circuito	Sensores	Substituição.
<b>Cabo Umbilical</b>	Sobrecarga	Sensores	Reprogramação ou redimensionamento
	Rompimento de cabos (via mecânica)	Sensores e Estação Meteorologica	Substituição.
<b>Cabos Submarinhos</b>	Corrosão	Sensores	Substituição.
	Rompimento de cabos (via mecânica)	Sensores e Estação Meteorologica	Substituição.
	Corrosão	Sensores	Substituição.

Seria ambicioso poder criar um algoritmo para um modelo geral. Todas as falhas presentes no sistema WEC são determinadas por protótipos ou registo de modelos em actividade e por isso, há que ter em atenção o preenchimento desta tabela.



---

## 6. Conclusões

---

**A**pós a realização do trabalho é importante retirar as conclusões adquiridas (secção 6.1) não omitindo as limitações bem esclarecidas e propondo temas de trabalhos futuros (secção 6.2)

### 6.1 Conclusões

Tendo em vista a prosperidade do sistema WEC, é importante reter que não só as tecnologias de PTO hidráulico estão em fase embrionária, como também todos os sistemas que desenvolvem energias renováveis em área marítima. Estes sistemas WEC estão associados em paralelo com o PTO de gerador linear que permite retirar uma maior quantidade energética no mesmo ciclo de onda.

No sentido da categorização das tecnologias WEC, dividiu-se os sistemas segundo o nível e custos de manutenção em três grupos qualitativos. As tecnologias de níveis e custos mais elevados de manutenção consideram a distância a costa, os componentes de construção não normalizados e construção técnicas especializadas e a linha do mar como factores relevantes neste estudo.

Na análise FMEA foi verificado que o subsistema estrutura e de segurança não contem grande risco e sempre que existir uma ação na manutenção deve ser inspecionado todo o equipamento. O grande controlo no subsistema PTO deverá ser efectuado por diversos sensores na entrada e saída entre componentes tal como no subsistema de transmissão eléctrica que apesar de ser o último da cadeia da tecnologia pode causar danos para os componentes anteriores.

Segundo a análise RPN, como deveria ser expectável, o risco concentra-se nos subsistemas de estrutura e PTO destacando os componentes: casco, gerador e motor. No subsistema de estrutura, as vedações deverão ser consideradas, no futuro, com materiais anti-corrosivos e resistentes.

Neste trabalho, a árvore de falhas elaborada é de um sistema WEC genérico e por isso não está ajustada para um modelo real, pois podem existir mais ou menos componentes com taxas de avarias diferentes, alterando a fiabilidade do projecto. Contudo, este trabalho final de mestrado permite sensibilizar para uma área subaproveitada das energias renováveis constituindo propostas de manutenção preventiva para a criação de um sistema tolerante a falhas com ferramentas de diagnóstico, capaz de tornar a energia renovável controlada e extensa.

Este trabalho termina com a minha participação, como coautor, no artigo publicado na conferência RENEW18 com o título “A review of fault tolerant design in wave energy converters”, editado posteriormente em livro [184].

## **6.2 Limitações e propostas futuras**

As dificuldades sentidas ao longo deste trabalho revelam a dificuldade de acesso a informações de encontro com o modelo de sistema WEC considerado. A limitação existente neste trabalho consiste no fato de considerarmos que todos os componentes se encontram na fase de vida útil. Seria necessário ter pelo menos dois valores da taxa de avarias em fases diferentes da vida do componente para poder estimar os restantes parâmetros da distribuição de Weibull.

Como propostas de trabalho futuro, sugiro que se faça uma análise para um modelo físico já existente e uma futura implementação que englobe todos os conceitos de *fault detection, isolation and tolerance*.

# Referências bibliográficas

- [1] P. McCullen *et al.*, “Wave energy in Europe : current status and perspectives,” vol. 6, pp. 405–431, 2002.
- [2] P. J. P. Calejo, “Sistema conversor de energia das ondas do mar,” 2012.
- [3] L. Wang, J. Isberg, and E. Tedeschi, “Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation : the wave-to-wire approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. October 2016, pp. 366–379, 2018.
- [4] J. R. Joubert and D. E. Bosman, “An investigation of the wave energy resource on the South African coast, focusing on the spatial distribution on the south west coast,” 2008.
- [5] M. Lehmann, F. Karimpour, C. A. Goudey, P. T. Jacobson, and M. R. Alam, “Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. February 2016, pp. 1300–1313, 2017.
- [6] C. W. Finkl and R. Charlier, “Electrical power generation from ocean currents in the Straits of Florida: Some environmental considerations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2597–2604, 2009.
- [7] S. Baker and A. Cornett, “Physical Modelling of the Lakeview Waterfront Connection Project,” no. May, 2016.
- [8] J. D. Bricker, M. Esteban, H. Takagi, and V. Roeber, “Economic feasibility of tidal stream and wave power in post-Fukushima Japan,” *Renew. Energy*, vol. 114, pp. 32–45, 2017.
- [9] M. A. J. R. Quirapas, H. Lin, M. L. S. Abundo, S. Brahim, and D. Santos, “Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 799–817, 2015.
- [10] O. Yaakob, T. A. Rashid, and M. Mukti, “Prospects for ocean energy in Malaysia,” ... *Conf. Energy ...*, vol. 2006, no. Icee, pp. 1–7, 2006.
- [11] F. Zabihian and A. S. Fung, “Review of marine renewable energies: Case study of Iran,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2461–2474, 2011.
- [12] R. Alamian, R. Shafaghath, S. J. Miri, N. Yazdanshenas, and M. Shakeri, “Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 468–476, 2014.
- [13] F. Aristodemo and D. Algieri Ferraro, “Feasibility of WEC installations for domestic and public electrical supplies: A case study off the Calabrian coast,” *Renew. Energy*, vol. 121, pp. 261–285, 2018.
- [14] J. Fernández Chozas and H. C. Soerensen, “State of the art of wave energy in Spain,” *2009 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2009*, vol. 215414, pp. 1–6, 2009.
- [15] H. Bernhoff, E. Sjöstedt, and M. Leijon, “Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the Baltic Sea,” *Renew. Energy*, vol. 31, no. 13, pp. 2164–2170, 2006.
- [16] S. Diaconu and E. Rusu, “Evaluation of various WEC devices in the Romanian near shore 2 Wave climate in the western Black Sea 3 Conversion of the Wave Energy into Electrical Energy ( wavedragon, pelamis, aquabuoy, archimeds, langlee, oceanec, OEbuoy, pontoon, seabased AB, wavebo),” *WSEAS Int. Conf. Energy Environ. Technol. Equip.*, pp. 92–102, 2013.
- [17] M. Saglam, E. Sulukan, and T. S. Uyar, “Wave Energy and Technical potential of Turkey,” *J. Nav. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 34–50, 2010.
- [18] J. Side and P. Jowitt, “Technologies and their influence on future UK marine resource development and management,” *Mar. Policy*, vol. 26, no. 4, pp. 231–241, 2002.
- [19] Wave Energy Center, “Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal,” pp. 1–72, 2004.
- [20] P. Mota and J. P. Pinto, “Wave energy potential along the western Portuguese coast,” *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 8–17, 2014.
- [21] J. C. C. Henriques, J. J. Cândido, M. T. Pontes, and A. F. O. Falcão, “Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal,” *Energy*, vol. 63, pp. 52–60, 2013.
- [22] E. Rusu and F. Onea, “Study on the influence of the distance to shore for a wave energy farm operating in the central part of the Portuguese nearshore,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 114, pp. 209–223, 2016.
- [23] E. Rusu and C. Guedes Soares, “Wave energy pattern around the Madeira Islands,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 771–785, 2012.

- [24] "Projecto FLOW," 2010.
- [25] G. F. Vargas, "WAVEROLLER : ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS E DE ESCOAMENTO INFLUENTES NA WAVEROLLER : ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS E DE ESCOAMENTO INFLUENTES NA," 2015.
- [26] C. Josset and A. H. Clément, "A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1379–1402, 2007.
- [27] S. Bozzi, G. Besio, and G. Passoni, "Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis (Aquabuoys, AWS, Langlee, OE buoy, Pelamis, Pontoon, Seapower, wavebob)," *Coast. Eng.*, vol. 136, no. March, pp. 130–146, 2018.
- [28] G. J. Dalton, R. Alcorn, and T. Lewis, "Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland , Portugal and North America," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 443–455, 2010.
- [29] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez De Alegría, and I. Kortabarria, "Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 413–434, 2013.
- [30] D. Roddier, C. Cermelli, A. Aubault, and A. Weinstein, "WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, 2010.
- [31] A. Clément *et al.*, "Wave energy in Europe: Current status and perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 6, no. 5, pp. 405–431, 2002.
- [32] D. Myrhaug, H. Wang, and L. E. Holmedal, "Stokes transport in layers in the water column based on long-term wind statistics," *Oceanologia*, p. 7, 2018.
- [33] B. G. Cahill and T. Lewis, "Wave energy resource characterisation of the Atlantic Marine Energy Test Site," *Int. J. Mar. Energy*, vol. 1, pp. 3–15, 2013.
- [34] Y. H. Yu and Y. Li, "Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system," *Comput. Fluids*, vol. 73, pp. 104–114, 2013.
- [35] L. D. Wright and A. D. Short, "Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis," *Mar. Geol.*, vol. 56, no. 1–4, pp. 93–118, 1984.
- [36] A. D. Short and G. Masselink, "The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model," *J. Coast. Res.*, vol. 9, no. 3, pp. 785–800, 2014.
- [37] T. S. Hedges, "Wave Breaking and Reflection," *Univ. Liverpool. Dep. Civ. Eng.*, pp. 1–3, 2009.
- [38] F. Madhi and R. W. Yeung, "On survivability of asymmetric wave-energy converters in extreme waves," *Renew. Energy*, vol. 119, pp. 891–909, Apr. 2018.
- [39] A. Mérigaud and J. V. Ringwood, "Condition-based maintenance methods for marine renewable energy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 53–78, 2016.
- [40] R. Henderson, "Design , simulation , and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter," vol. 31, pp. 271–283, 2006.
- [41] I. S. A. A. Rodrigues and E. Eletrotécnica, "Estudo do Galgamento em Conversor de Ondas Oceânicas," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.
- [42] R. E. Harris, L. Johanning, and J. Wolfram, "Mooring systems for wave energy converters : A review of design issues and choices," *3rd Int. Conf. Mar. Renew. Energy*, no. January 2006, pp. 1–10, 2004.
- [43] J. Davidson and J. V. Ringwood, "Mathematical modelling of mooring systems for wave energy converters - A review," *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.
- [44] A. F. d. O. Falcão, "Wave energy utilization: A review of the technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010.
- [45] B. Wu, T. Chen, J. Jiang, G. Li, Y. Zhang, and Y. Ye, "Economic assessment of wave power boat based on the performance of 'Mighty Whale' and BBDB," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. May 2017, pp. 946–953, 2018.
- [46] P. E. Ventures, "Oregon Wave Energy Trust Utility Market Initiative Task 2 . 1 . 2 : Garrad Hassan Wave Energy Technology Review," *Energy*, no. December, 2009.
- [47] J. R. Joubert, J. L. Van Niekerk, and J. Reinecke, "LIST Wave Energy Converters," vol. 27, no. 0, pp. 0–95, 2013.
- [48] T. Whittaker and M. Folley, "Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 370, no. 1959, pp. 345–364, 2012.
- [49] A. Rafiee and J. Fiévez, "Numerical Prediction of Extreme Loads on the CETO Wave Energy Converter," *Proc. 11th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. December, 2015.

- [50] A. Pecher, J. P. Kofoed, and T. Larsen, "Design specifications for the hanstholm WEPTOS wave energy converter," *Energies*, vol. 5, no. 4, pp. 1001–1017, 2012.
- [51] J. P. Kofoed, "Model Testing of the Wave Energy Converter Seawave Slot-Cone Generator," *Hydraul. Coast. Eng.*, vol. 18, 2005.
- [52] C. Jones, J. Magalen, and J. Roberts, "Wave Energy Converter ( WEC ) Array Effects on Wave , Current , and Sediment Circulation : Monterey Bay , CA," no. September, 2014.
- [53] A. F. O. Falcão, J. J. Cândido, P. A. P. Justino, and J. C. C. Henriques, "Hydrodynamics of the IPS buoy wave energy converter including the effect of non-uniform acceleration tube cross section," *Renew. Energy*, vol. 41, pp. 105–114, 2012.
- [54] A. Wachter, "Mathematical and Numerical Modeling of the AquaBuOY Wave Energy Converter," *Math. Case Stud.*, vol. 2, no. February, pp. 16–33, 2010.
- [55] X. Garnaud and C. C. Mei, "Comparison of wave power extraction by a compact array of small buoys and by a large buoy," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 4, no. 6, p. 519, 2010.
- [56] J. Weber, F. Mouwen, a. Parish, and D. Robertson, "Wavebob – Research & Development Network and Tools in the Context of Systems Engineering," *Ewtec*, no. Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conf., Uppsala, Sweden, pp. 416–420, 2009.
- [57] R. H. Hansen, M. M. Kramer, and E. Vidal, "Discrete displacement hydraulic power take-off system for the wavestar wave energy converter," *Energies*, vol. 6, no. 8, pp. 4001–4044, 2013.
- [58] A. Pecher, J. P. Kofoed, and S. (Online service), *Handbook of Ocean Wave Energy*. 2017.
- [59] A. P. McCabe, A. Bradshaw, J. A. C. Meadowcroft, and G. Aggidis, "Developments in the design of the PS Frog Mk 5 wave energy converter," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 2, pp. 141–151, 2006.
- [60] C. Pérez-Collazo, D. Greaves, and G. Iglesias, "A review of combined wave and offshore wind energy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 141–153, 2015.
- [61] G. Bracco, A. Cagninei, E. Giorelli, G. Mattiazzo, D. Poggi, and M. Raffero, "Experimental validation of the ISWEC wave to PTO model," *Ocean Eng.*, vol. 120, pp. 40–51, 2016.
- [62] D. D. Grilo, "Geração de energia a partir das ondas do mar," 2013.
- [63] U. Azimov, "Feasibility study and design of an ocean wave power generation station integrated with a decommissioned offshore oil platform in UK waters," vol. 8, pp. 161–174, 2017.
- [64] A. Babarit, "A database of capture width ratio of wave energy converters," *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 610–628, 2015.
- [65] L. Castro-santos, G. P. Garcia, A. Estanqueiro, and P. A. P. S. Justino, "Electrical Power and Energy Systems The Levelized Cost of Energy ( LCOE ) of wave energy using GIS based analysis : The case study of Portugal," *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 65, pp. 21–25, 2015.
- [66] X. S. Si, W. Wang, C. H. Hu, and D. H. Zhou, "Remaining useful life estimation - A review on the statistical data driven approaches," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 213, no. 1, pp. 1–14, 2011.
- [67] A. Kolios, L. F. Di Maio, L. Wang, L. Cui, and Q. Sheng, "Reliability assessment of point-absorber wave energy converters," *Ocean Eng.*, vol. 163, no. October 2017, pp. 40–50, 2018.
- [68] M. Zhang, T. Wang, T. Tang, M. Benbouzid, and D. Diallo, "An imbalance fault detection method based on data normalization and EMD for marine current turbines," *ISA Trans.*, 2017.
- [69] J. Wolfram, "On Assessing the Reliability and Availability of Marine Energy Converters: The Problems of a New Technology," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab.*, vol. 220, no. 1, pp. 55–68, 2006.
- [70] N. O. T. Measurement, "Handbook Listing of Fastener Manufacturer ' S," *Measurement*, no. November, 2008.
- [71] C. Ocean, P. Delivery, and R. Yemm, "JOINT SYSTEM TEST Prepared by," 2003.
- [72] N. J. M. W. Harwell, Aere J. A. HUDSON, D. C. PHILLIPS, "Review Materials aspects of wave energy converters," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, pp. 1337–1363, 1980.
- [73] M. M. Kramer, L. Marquis, P. Frigaard, W. S. a S, and P. Allé, "Performance Evaluation of the Wavestar Prototype," *9th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, 2011.
- [74] M. C. Eti, S. O. T. Ogaji, and S. D. Probert, "Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture," *Appl. Energy*, vol. 83, no. 11, pp. 1235–1248, 2006.

- [75] S. Ambühl, *Reliability of Wave Energy Converters*. 2015.
- [76] P. Wang, X. Tian, T. Peng, and Y. Luo, "A review of the state-of-the-art developments in the field monitoring of offshore structures," *Ocean Eng.*, vol. 147, no. September 2017, pp. 148–164, 2018.
- [77] M. Blanke and D. T. Nguyen, "Fault tolerant position-mooring control for offshore vessels," *Ocean Eng.*, vol. 148, no. 7491, pp. 426–441, 2018.
- [78] N. Logistics Technology Support Group and S. W. C. (CDNSWC), *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment*, no. Jan. 2010.
- [79] G. Backer, "Hydrodynamic design optimization of wave energy converters consisting of heaving point absorbers," *Ghent Univ. Belgium*, pp. 1–3, 2009.
- [80] B. Lu, "A Review of Recent Advances in Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis," *IEEE J. Ocean. Eng.*, p. 7, 2012.
- [81] Y. Hong, R. Waters, C. Boström, M. Eriksson, J. Engström, and M. Leijon, "Review on electrical control strategies for wave energy converting systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 329–342, 2014.
- [82] T. Queen, "ISLAY LIMPET WAVE POWER PLANT," 2002.
- [83] J. C. C. Henriques, L. M. C. Gato, J. M. Lemos, R. P. F. Gomes, and A. F. O. Falcão, "Peak-power control of a grid-integrated oscillating water column wave energy converter," *Energy*, vol. 109, pp. 378–390, 2016.
- [84] C. Real, "Condition monitoring and fault diagnosis in wind energy systems," 2015.
- [85] H. Schulte, E. Gauterin, H. Schulte, and E. Gauterin, "Input-to-State Stability Condition for Passive Fault-Tolerant Control of Wave Wind Energy Converters," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 257–262, 2015.
- [86] A. Thakker and M. A. Elhemry, "3-D CFD analysis on effect of hub-to-tip ratio on performance of impulse turbine for wave energy conversion," *Therm. Sci.*, vol. 11, no. 4, pp. 157–170, 2007.
- [87] A. F. De, O. Falcão O, and P. A. P. Justino, "OWC wave energy devices with air flow control," *Ocean Eng.*, vol. 26, pp. 1275–1295, 1999.
- [88] M. Alberdi and A. J. Garrido, "Control strategies for OWC wave power plants," in *American Control Conference*, 2010, no. 1, pp. 4319–4324.
- [89] M. J. . Greenhow, J. H. Rosen, and M. Reed, "Control strategies for the Clam wave energy device," *Appl. Ocean Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 197–206, 1984.
- [90] J. C. C. Henriques, L. M. C. Gato, A. F. O. Falcão, E. Robles, and F. X. Faÿ, "Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter," *Renew. Energy*, vol. 90, pp. 229–241, 2016.
- [91] A. F. António, "Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator," *Ocean Eng.*, vol. 34, no. 14–15, pp. 2021–2032, 2007.
- [92] A. C. Fernandes, "Identificação e Controlo de um Conversor de Energia das Ondas usando Modelos Fuzzy e Redes Neurais," 2011.
- [93] D. Bull and E. Johnson, "Optimal Resistive Control Strategy for a Floating OWC Device," *Proc. 11th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, 2013.
- [94] A. F. O. Falcão, L. M. C. Gato, and E. P. A. S. Nunes, "A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters. Part 2. Results from model testing," *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 159–164, 2013.
- [95] A. F. O. Falcão and J. C. C. Henriques, "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016.
- [96] R. P. F. Gomes, J. C. C. Henriques, L. M. C. Gato, and A. F. O. Falcão, "Multi-point aerodynamic optimization of the rotor blade sections of an axial-flow impulse air turbine for wave energy conversion," *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 570–580, 2012.
- [97] L. B. Hernandez, "MODELING LINK FOR OCEAN WAVE ENERGY OF POINT ABSORBERS : A MATHEMATICAL FRAMEWORK," no. September, pp. 1–31, 2017.
- [98] J. V. Ringwood and S. Butler, "Optimisation of a Wave Energy Converter," *Proc. IFAC Conf. Control Appl. Mar. Syst.*, pp. 155–160, 2004.
- [99] Z. Feng and E. C. Kerrigan, "Declutching Control of Wave Energy Converters using Derivative-Free Optimization," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 47, no. 3, pp. 7647–7652, 2014.
- [100] Z. Feng and E. C. Kerrigan, "Latching Declutching Control of Wave Energy Converters Using Derivative-Free Optimization," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 773–780, 2015.
- [101] A. F. de O. Falcão, P. A. P. Justino, J. C. C. Henriques, and J. M. C. . André, "Reactive versus latching phase control of a two-body heaving wave energy converter," *Tenth Eur. Control Conf. Budapest, Hungary*, pp. 3731–3736, 2009.

- [102] G. Bacelli and J. Ringwood, "Constrained control of arrays of wave energy devices," *Int. J. Mar. Energy*, vol. 3–4, pp. e53–e69, 2013.
- [103] B. F. M. Child, "On the configuration of arrays of floating wave energy converters," 2011.
- [104] S. P. Zhu and L. Mitchell, "Diffraction of ocean waves around a hollow cylindrical shell structure," *Wave Motion*, vol. 46, no. 1, pp. 78–88, 2009.
- [105] E. Abraham and E. Kerrigan, "Optimal active control and optimization of a wave energy converter," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–8, 2013.
- [106] J. S. da Costa, P. Beirao, and D. Valerio, "Internal Model Control applied to the Archimedes Wave Swing," in *Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2007, no. 1, p. 6.
- [107] S. Bellew and T. Stallard, "Linear Modelling of Wave Device Arrays And Comparison To Experimental and Second Order Models," *Int. Work. Water Waves Float. Bodies*, pp. 2–5, 2010.
- [108] A. F. d. O. Falcão, "Phase control through load control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic PTO system," *Ocean Eng.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 358–366, 2008.
- [109] S. Bellew, T. Stallard, and P. K. Stansby, "Optimisation of a Heterogeneous Array of Heaving Bodies," *Proc. 8th Eur. Wave Tidal Energy Conf. Uppsala, Sweden*, pp. 519–527, 2009.
- [110] G. De Backer, M. Vantorre, C. Beels, J. De Rouck, and P. Frigaard, "Performance of closely spaced point absorbers with constrained floater motion," *Proc. 8th Eur. Wave Tidal Energy Conf. Uppsala, Sweden*, pp. 806–817, 2009.
- [111] K. Alam and R. Lake, "Tunable Control Strategy for Wave Energy Converters With Limited Power Takeoff Rating," vol. 6, no. 2, pp. 2–6, 2007.
- [112] R. A. Petitt and E. A. Terray, "Microwave backscatter from the sea: Modulation of received power and Doppler bandwidth by long waves," vol. 99, pp. 9751–9766, 1994.
- [113] A. C. M. O'Sullivan and G. Lightbody, "The Effect of Viscosity on the Maximisation of Electrical Power from a Wave Energy Converter under Predictive Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14698–14704, 2017.
- [114] M. Peñalba Retes, G. Giorgi, and J. V. Ringwood, "A Review of non-linear approaches for wave energy converter modelling," *11th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. 1, pp. 1–10, 2015.
- [115] M. Penalba, G. Giorgi, and J. V. Ringwood, "Mathematical modelling of wave energy converters : A review of nonlinear approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. November 2016, pp. 1188–1207, 2017.
- [116] L. Wang and J. Isberg, "Nonlinear passive control of a wave energy converter subject to constraints in irregular waves," *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 6528–6542, 2015.
- [117] M. Sterling, "Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1196–1204, 2008.
- [118] J. Westphalen, "Extreme Wave Loading on Offshore Wave Energy Devices using CFD," *PhD thesis, Univ. Plymouth*, 2011.
- [119] M. Leijon *et al.*, "Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 219–224, 2005.
- [120] H. Polinder, M. E. C. Damen, F. Gardner, and M. G. S. Prado, "Archimedes wave swing linear permanent-magnet generator system performance," *6th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. March, pp. 383–388, 2005.
- [121] R. K. Holm, N. I. Berg, M. Walkusch, P. O. Rasmussen, and R. H. Hansen, "Wave energy conversion," *Deep Sea Res. Part B. Oceanogr. Lit. Rev.*, vol. 30, no. 6, p. 491, 2013.
- [122] A. Bucchi and G. E. Hearn, "Delay or removal of aneurysm formation in the Anaconda wave energy extraction device," *Renew. Energy*, vol. 55, no. 0, pp. 104–119, 2013.
- [123] A. J. Vining and A. Muetze, "Linear Generators for Direct-Drive Ocean Wave Energy Conversion," pp. 798–804, 2007.
- [124] M. Penalba and J. V. Ringwood, "A review of wave-to-wire models for wave energy converters," *Energies*, vol. 9, no. 7, 2016.
- [125] M. Kim, S. M. Wi, H. Joe, H. Kwon, and S. C. Yu, "Multi-body point absorber system without a mooring," *Ocean. 2014 - Taipei*, pp. 1–4, 2014.
- [126] Y. Yu and Y. Li, "Computers & Fluids Reynolds-Averaged Navier – Stokes simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system," vol. 73, pp. 104–114, 2013.
- [127] Z. Liu and B. Hyun, "Numerical Prediction for Overtopping," *Proc. Ocean. 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, 2008.

- [128] D. Vicinanza and P. Frigaard, "Wave pressure acting on a seawave slot-cone generator," *Coast. Eng.*, vol. 55, no. 6, pp. 553–568, 2008.
- [129] P. R. Theis, L. Johanning, and T. Gordelier, "Component Reliability Testing for Wave Energy Converters : Rationale and Implementation," *EWTEC 2013 Proc.*, 2013.
- [130] António F. O. Falcão, "Modelling of Wave Energy Systems," 2014.
- [131] S. Butterfield, W. Musial, J. Jonkman, and P. Scavounos, "Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines," *Offshore Wind Conf.*, p. 13, 2005.
- [132] M. Greenhow, T. Vinje, P. Brevig, and J. Taylor, "A theoretical and experimental study of the capsizing of a duck in extreme waves," *J. Fluid Mech.*, vol. 118, no. June, pp. 221–239, 1982.
- [133] K. T. GÜRSEL, "a Technological Assessment Of the Wave Energy Converter," *Sci. Bull. Nav. Acad.*, vol. 19, no. 1, pp. 408–417, 2016.
- [134] J. Wagner, J. Wagner, J. Thies, C. Groom, A. M. Hayatdavoodi, and M. Greer, "Poseidon : A Novel Wave Energy Converter," vol. 338, no. April, p. 2016, 2016.
- [135] L. Cameron *et al.*, "Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter," in *3rd International Conference on Ocean Energy*, 2010, no. October, pp. 1–12.
- [136] A. Henry, K. Doherty, L. Cameron, T. Whitter, and R. Doherty, "Advances in the Design of the Oyster Wave Energy Converter," *Proc. R. Inst. Nav. Archit. Mar. Offshore Renew. Energy Conf.*, no. December 2015, 2010.
- [137] T. Whittaker, D. Collier, M. Folley, M. Osterried, and A. Henry, "The development of Oyster - A shallow water surging wave energy converter ," *7th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. January 2017, 2007.
- [138] A. J. C. King, "Numerical Modelling of the 'Bombora' Wave Energy Conversion Device," *19th Australas. Fluid Mech. Conf.*, no. December, 2014.
- [139] S. Salter, "4 Case studies: Wave energy converters (PELAMIS, Oyster, Limpet mutriku, Wavedragon, Powerbuoy, Penguin )," pp. 185–221, 2014.
- [140] E. Ozkop and I. H. Altas, "[IMPORTANT] Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 106–115, 2017.
- [141] M. Prado and H. Polinder, *Case study of the Archimedes Wave Swing (AWS) direct drive wave energy pilot plant*. Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [142] J. R. M. Taylor and I. Mackay, "The design of an eddy current dynamometer for a free-floating sloped IPS buoy," *Mar. Renew. Energy Conf.*, pp. 67–74, 2001.
- [143] A. A. Babajani, M. Jafari, and P. Hafezi Sefat, "Numerical investigation of distance effect between two Searasers for hydrodynamic performance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 3, pp. 2257–2268, 2016.
- [144] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, 2009.
- [145] J. Weber, R. Costello, F. Mouwen, J. Ringwood, and G. Thomas, "Techno-economic WEC system optimisation - Methodology applied to Wavebob system definition," *3rd Int. Conf. Ocean Energy*, p. not paginated, 2010.
- [146] A. Falcao, "Modelling of Wave Energy Conversion," *Univ. Lisbon*, p. 130, 2014.
- [147] F. Salcedo, R. Rodriguez, P. Ricci, and M. Santos, "OCEANTEC: Sea Trials of a Quarter Scale Prototype," *Proceed8th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, pp. 460–465, 2009.
- [148] P. Haren, "Optimal design of Hagen-Cockerall raft," 1978.
- [149] H. Hotta, Y. Washio, H. Yokozawa, and T. Miyazaki, "R&D on wave power device 'Mighty Whale,'" *Renew. energy*, vol. 9, no. 1–4, pp. 1223–1226, 1996.
- [150] R. E. Melchers, *Principles of marine corrosion*. 2016.
- [151] A. F. O. Falcão, J. C. C. Henriques, and J. J. Cândido, "Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter," *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 369–381, 2012.
- [152] Wave Star A/S, "Wavestar prototype at Roshage, Performance data for ForskVE project no 2009-1-10305 phase 1 & 2," 2013.
- [153] A. Weinstein, G. Fredrikson, M. J. Parks, and K. Nielsen, "AquaBuOY - The Offshore Wave Energy Converter Numerical Modeling and Optimization," *MTTS/IEEE Techno-Ocean*, pp. 1854–1859, 2004.
- [154] "PowerBuoy plan plagued by bad weather," no. October, p. 2012, 2012.



- [155] P. Version, "PB500 , 500 KW UTILITY - SCALE POWERBUOY PROJECT," 2016.
- [156] D. G. Wilson *et al.*, "A comparison of WEC control strategies," *Sand2016-4293*, no. April 2015, 2016.
- [157] G. Iglesias, M. Alvarez, and P. Garcia, "Renewable Energy Sources Charged with Energy from the Sun and Originated from Earth-Moon Interaction - Wave Energy Converters," *Encycl. Life Support Syst.*, 2012.
- [158] A. Babarit, M. Guglielmi, and A. H. Clement, "Declutching control of a wave energy converter," *Ocean Eng.*, vol. 36, pp. 1015–1024, 2009.
- [159] R. H. Bracewell, "Frog and Ps Frog : a Study of Two Reactionless Ocean Wave," 1990.
- [160] C. Retzler, "Measurements of the slow drift dynamics of a model Pelamis wave energy converter," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 2, pp. 257–269, 2006.
- [161] B. Czech and P. Bauer, "Wave energy converter concepts : Design challenges and classification," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 4–16, 2012.
- [162] S. Kong, F. Application, and P. Data, "( 12 ) United States Patent," vol. 2, no. 12, pp. 12–15, 2011.
- [163] A. Gray, B. Dickens, T. Bruce, I. Ashton, and L. Johanning, "Reliability and O & M sensitivity analysis as a consequence of site speci fi c characteristics for wave energy converters," *Ocean Eng.*, no. June, pp. 1–19, 2017.
- [164] A. Pecher, J. P. Kofoed, T. Larsen, and T. Marchalot, "Experimental Study of the WEPTOS Wave Energy Converter," *Proc. 31th Int. Conf. Ocean Offshore Arct. Eng. OMAE*, vol. 7, pp. 877–885, 2010.
- [165] P. Examiner and E. Swinehart, "( 12 ) United States Patent," 2008.
- [166] P. Astone, "The gravitational wave detector Nautilus." 1997.
- [167] N. Delmonte, D. Barater, F. Giuliani, and P. Cova, "Oscillating Water Column Power Conversion : a Technology Review," *Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), 2014 IEEE*, pp. 1852–1859, 2014.
- [168] "A Brief Review of Wave Energy," no. May, 1999.
- [169] P. Beir, "Modelling and Control of a Wave Energy Modelling and Control of a Wave Energy Converter : Archimedes Wave Swing," no. May 2007, 2016.
- [170] R. P. F. Gomes, J. C. C. Henriques, L. M. C. Gato, and A. F. O. Falcão, "Testing of a small-scale floating OWC model in a wave flume," *Int. Conf. Ocean Energy*, no. 1982, pp. 1–7, 2012.
- [171] K. Koca, A. Kortenhaus, H. Oumeraci, B. Zanuttigh, E. Angelelli, and M. Cantu, "Energy Converters Recent Advances in the Development of Wave Energy Converters," no. September, 2013.
- [172] J. A. Burton and Q. Creek, "( 12 ) Patent Application Publication ( 10 ) Pub . No . : US 2012 / 0032444 A1 Nus," 2012.
- [173] M. Folley, R. Curran, and T. Whittaker, "Comparison of LIMPET contra-rotating wells turbine with theoretical and model test predictions," *Ocean Eng.*, vol. 33, no. 8–9, pp. 1056–1069, 2006.
- [174] D. Bull and M. E. Ochs, "Technological Cost-Reduction Pathways for Oscillating Water Column Wave Energy Converters in the Marine Hydrokinetic Environment," 2013.
- [175] D. Vicinanza, F. Dentale, and M. Buccino, "Structural Response of Seawave Slot-cone Generator ( SSG ) from Random Wave CFD Simulations," *Twenty-fifth Int. Ocean Polar Eng. Conf.*, no. JUNE, p. 8, 2015.
- [176] R. Magesh, "OTEC technology- A world of clean energy and water," *WCE 2010 - World Congr. Eng. 2010*, vol. 2, pp. 1618–1623, 2010.
- [177] P. R. Thies, J. Flinn, and G. H. Smith, "Is it a showstopper ? Reliability assessment and criticality analysis for Wave Energy Converters," *Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, no. January 2009, pp. 21–30, 2009.
- [178] J. I. P. Fps, "Floating production system JIP FPS mooring integrity Prepared by Noble Denton Europe Limited," 2006.
- [179] S. Chandrasekaran, "Power Generation Using Mechanical," vol. 3, no. 1, pp. 57–70, 2012.
- [180] M. Shafiee and F. Dinmohammadi, "An FMEA-Based Risk Assessment Approach for Wind Turbine Systems: A Comparative Study of Onshore and Offshore," pp. 619–642, 2014.
- [181] A. Mentis and I. H. Helvacioğlu, "An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems," *Ocean Eng.*, vol. 38, no. 2–3, pp. 285–294, 2011.
- [182] S. F. Yasseri and H. Bahai, "Availability assessment of subsea distribution systems at the architectural level," *Ocean Eng.*, vol. 153, no. January, pp. 399–411, 2018.

- [183] T. Submitted and R. Fulfillment, "Condition Monitoring of Axial Piston Pump," 2005.
- [184] M. Kamarlouei, B. F. Cruz, M. J. G. C. Mendes, J. F. Gaspar, and C. Guedes Soares, "A review of fault tolerant design in wave energy converters," in *Advances in Renewable Energies Offshore*, C. Guedes Soares, Ed. London, UK: Taylor and Francis Group, 2018, pp. 369–378.

## 7. ANEXOS

### ANEXO I – Quadro das Tecnologias WECs

<i>Tecnologia, Ano</i>	<i>Empresa, País</i>	<i>Shore</i>
<b>1. Terminator</b>		
<b>1.1 Oscillating Water Column (OWC)</b>		
<b>a) Estrutura fixa</b>		
Islay Limpet, 1991	Islay Limpet e WaveGen Voigh Hydro wave, Scotland	Onshore
Mutriku, 2011	Ente Vasco de la Energía (EVE), Spain	Onshore
WECA	Daedalus Informatics Ltd, Greece	Onshore
Tunneled WEC, 2002	SeWave ltd, Denmark	Onshore
_PICO , 2004	Wave Gen IST, Portugal	Onshore
Vizhinjam OWC, 1991	Indian Institute of Technology – Chennai, India	Onshore
Multiresonant OWC	Kvaerner Brug's, Norway	Onshore
Onshore oscillating buoy, 2001 (MOWC)	Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), China	Onshore
Sanze shoreline gully, 1983	Japan	Onshore
Isle of Islay, 1985	Queen's University of Belfast, Scotland	Onshore
osprey	Wavegen, UK	Onshore
Ovadia, 1995	Shmuel Ovadia, Israel	Onshore
Pendulor	Muroran institute of technology, harbor research center	Onshore
Purenco	Straumekraft as	Nearshore
Hydroair	Dresser rand	Onshore
Drakoo-b	Hann-ocean	Nearshore
Oceanlinx, 1997	Energytech, USA	Offshore
Sakata, 1989	Ente Vasco de la Energía (EVE), Spain	Offshore
<b>b) Flutuador</b>		
OWEL, 2013	Ocean Wave Energy LTD, UK	nearshore
OE Buoy, 1986-2006	Ocean Energy, Irland	Nearshore
WavePlane	Casey Ocean system	Nearshore
Mighty Whale, 1998	JAMSTEC, Japan	Offshore
Sperboy, 1998	Embley Energy, UK	nearshore
MRC1000, 2007	Orecon, Spain	Nearshore

SeaDog,2008	Inri, Mexico	Offshore
Aws-iii,2010	Aws Ocean Energy , UK	offshore
Sparbuoy	Sealite, USA	Offshore
Pisys,2002	Pipo system, Spain	Offshore
MARMOK-A-5, 2016	BASQUE at Oceantec Energias Marinas, Spain	Offshore

## 1.2 Overstopping

### a) Estrutura fixa

Slot-cone generator Seawave SSGS,2007	WAVEEnergy-Stavanger, Norway	Onshore
Tapchan,1996	HK RE	Onshore
Floating wave power vessel,1980's	Seapower, Irland	Offshore

### b) Flutuador

Weptos	Weptos	Nearshore
Powergin	Kinetic wave power	Nearshore
WaveDragon, 2003	Erik Friis-Madsen, Denmark	offshore
Bombora	Bombora, Australia	Offshore

## 1.3. Oscilating Surge Converter

Wavepiston,2013	Wavepiston ApS, Denmark	Nearshore
Ccell,2015	ZYBA, UK	nearshore
Resolute Wec	Respcite Marine Energy, inc	Onshore
Biowave, LAB	BioPower System	Offshore
wave rotor	Ecofys, Denmark	Offshore
CETO WAVE POWER,1999 (Similar ao II e III)	Carnegie and EDF Energies Nouvelles, Australia	offshore
R38 / 50 KW ou R115/150 KW, 2010	40South Energy, UK	Offshore
Poseidon (= wavepiston)	Floating Power Plant, Denmark	Offshore
Eel Grass	aero virnment inc	Offshore
energy conversion platform ecp	protean energy, Australia	Offshore
WaveBlanket	Benjamin Gatti	Offshore
Oyster , 2005	Aquamarine Power, UK	Offshore
Waveroller, 1994	AW Energy OY, Finland (Portugal)	Offshore
Setellen Wave Energy Converter	Mr. Muller stellenbosh, South Africa	offshore
Wave Rider	Seavolt, USA	Offshore
DMP Device	M3 Wave LLC	offshore
WaveMaster		offshore
Langlee Wave Power	Langlee Wave power, Julius Espedal CEO	offshore
Oceanstar	Bourne energy, American	offshore
Wave Clapper/powerwing	Eco Wave Power	offshore
OMI Wavepump,	Ocean motion international, USA	offshore
Wave Turbine	Green Cat Renewables Ltd	Nearshore
SALTER'S Duck, 1980's	Universidade edinbug Stevem Salter	Offshore
akervoll-patents	euro waveenergy	Offshore
WET EnGen, , Canada	Wave Energy Technology Inc., Canda	Offshore
Design Wave Energy Transforming Turbine	Tbilisi State University, Georgia	offshore

## 2. Point Absorbers

### a)Flutuador

#### Heaving Point-Absorber (HPA) translação

Burin Wave power pump	College of NorthAtlantic, Canada	Onshore
-----------------------	----------------------------------	---------

Wave Energy Machine , 2007		Onshore
Sea waves Power plant (SDE), 2010	SDE, Israel	Onshore
FO3(Mancester Bobber)	Seewec consortion Fred Olsen, UK	Nearshore
Sloped buoy,1992	Wave4power, UK	Offshore
Aegir Dynamo, Lab	Ocean Navitas, UK	Nearshore
hidroflot	Ceflot, Spain	Nearshore
Oceanus 2, 2007	Seatricity Ltd, UK	Nearshore
SINN power wave energy converter, 2014	SINN GmbH, German	Nearshore
Vert 7	Vert labs, Scotland	Nearshore
WaveStar, 2010	WaveStar, Denmark	Offshore
Seabased AB, 2015	Seabased, Sweeden	Offshore
Unnamed Ocean wave powered generator, 2004	SRI nternational, USA	Offshore
Aquaybuoy, 2003	SSE Renewables Limited e Finavera Wind Energy, Canada	Offshore
C-Wave	C-Wave Ltd, UK	Offshore
Powerbuoy, 1997	Ocean Power Tecnologies, USA	Offshore
WAP and WWP	Reneable Energy Pump	Offshore
Waveberg	Waveberg	Offshore
Wave-powered Difragma	South African Inventor, SouthAfrica	offshore
Leancon	Leancon	Offshore
Pneumatically Stabilized plantaform	Float Incorporated	Offshore
wavebob, 1999	Eavebob Ltd, Irland	Offshore
Archimeds WS	AWS Ocean Energy, Portugal	Offshore
Brandi Generator, 2009	Brandi Motor, Germany	Offshore
Float Electric Power stations	Applied Tencnologies Company	Offshore
Sri international	Florida	Offshore
Pelagic Power	pelagic Power	Offshore
Sync WavePower Resonator	Sync Wave System	Offshore
Wavepump	OWWE ltd	Offshore
Gyro-wave_gen	Gyrowavegen	Offshore
Centipod (=wavestar)	Ecomerit Technologie	offshore
Seaheart	Oceanic power, Spain	offshore
Searaser, 2009	Alvin Smith (dartmouth wave energy) UK	Offshore
WEGA	Sea for life, Portugal	offshore
Searay	colombia power tehcnology oregon, USA	offshore
Mobile wave energy harvester	fraunhofer, USA	offshore
Aquagen surge drive	aquagen technolgy, Australia	offshore
IOWEP ( intentionium offshore wave energy project)	intentionium norway Marinet, Norway	offshore
Swedish hose-pump	Swedes	Offshore
Danish wave energy power float pump	danish wave power	Offshore
Hyperbaric coppe uftrj device	copper federal uniserity of Rio de Janeiro, Brasil	Offshore
electric buoy	aqua-magnetics inc	Offshore
pontoon	PPC pontoon power converter	Offshore
ohs, 2006	Amocean Inc, USA	Offshore
wavesurf	ocean energy industries	Offshore
Hybrid Float	perpetuwave power	Offshore

Direct Energy Conversion Method (DECM)	Trident energy Ltd, UK	Offshore
WaveEL, 2010	Wave4power, Sweden	Offshore
Cycloidal Wave Converter, 2006	Atargis Energy Corporation, USA	Offshore
Lever operated pivoting float	resen waves	Offshore
SARAH pump	College of the north atlantic	Offshore
CorPower WEC	CorPower Ocean	Offshore
SeaCap	Hydro cap energy	Offshore
Snapper	snapper consortium	Offshore
Npower wec	npower wec	Offshore
G1-t	prototipo	Offshore
Wave Energy Buoy	Colombia Power, USA	Offshore
nowerian buoy, 2017	waver4power, Norway	Offshore
Azura , 2015	Hawaii Clean Energy Initiative, Havai	Offshore
Albatern WaveNet, 2010	Albatern, UK	Offshore
FlanSean, 2010	Flansea, Belgica	Offshore
L-10, 2008	Columbia power energy , USA	Offshore
Lysekill Project, 2002	Uppsala University, Sweeden	Offshore
Ocean Grazer, 2011	University of Groningen, Netherlands	Offshore
IPS buoy	waver4power	Offshore
Powerpod linear generator DCEM	trident energy ltd	Offshore
Wavesub	marine power system	Offshore
<b>oscillating pitching converter (OPC)</b>		
Energen Wave Generator		Nearshore
WET-nz	Wave Energy Technology Inc., Australia	Nearshore
SurPower	Seawood Design Inc	Nearshore
OEMP	OEMP	Nearshore
Triton	Neptune Renable energy	Nearshore
MotorWave	Lucian gamborota, Hongkong	Nearshore
Lever Operated Pivoting Float (LOPF)	SwellFuel Christopher Olson	Nearshore
Wave Catcher	Offshore Island, ltd	Nearshore
Iwave	T.SAMPATH KUMAR, India	Nearshore
OceanTreader	Green ocean energy ltd	Nearshore
Oceantec, 2008	Tecnalía, Spain	Nearshore
Penguin / wello, 2008	WellowOy, Finland	Nearshore
OWEC	OWECO	Offshore
PS Frog	Lancaster University	Offshore
SEAREV	Ecole Central de nantes Fr	Offshore
Squid	AlbaTERN	Offshore
Tetron	Joules Energy Efficient Services Ltd, Irland	Offshore
Nodding beam	nodding beam	Offshore
Ocean harvester	ocean harvesting tecnologies	Offshore
Sea Power plantaform	Sea power ltd	Offshore
Yeti cluster system	Avium A.S.	Offshore
Horizon Platform	Elgen Wave	Offshore
WAG (wave activited generator)	Ryokuseisha	Offshore
Yu oscillating generator (YOG)	Yu wnergy corp	Offshore

Crestwing,2011	Crestwing ApS, Denmark	Offshore
boya arlas	Boya Arlas, Spain	Offshore
<b>Atenuator</b>		
Wavemill, 1998	Wavemill energy corp, Canada	Onshore
EGWAP (Electricity Generated Wave Pipe)	Able tecnology	Offshore
Navatek	navatek ltd, USA	onshore
Floating wave generator	Glen Eduard Cook	Offshore
FLOW	Martifer Energy Systems, Portugal	Nearshore
McCabe Wave pump	McCabe Wave Energy Hydam Technologies, Irland	Nearshore
Vigor, 2012	Vigor Wave Energy Ab, Sweeden	nearshore
Seatricity	Seatricity Ltd	Offshore
Cockerell raft	Cockrell	Offshore
Etymol	F-tec infenieria ltd, Chile	Nearshore
Anaconda Wave energy, 2008	Chekmate, UK	Nearshore
Dexa wec	Dexa wave ltd, USA	Nearshore
EB Front	Lancaster University	Nearshore
Nautilus	IVEC pty, ltd, Australia	nearshore
Pelamis Wave energy Converter, 1998	ocean power delevery / pelamis wave Power, Portugal UK	Offshore
<b>4. Outras</b>		
Solar Waveflex	Payley (phil Pauley inovation)	Nearshore
Gentec wats	greenheat system	Nearshore
magnetohydroniamic	SARA ( Scientific apllications and Reserach associates	Nearshore
Lifesaver	BOLT (Fred OLSON)	Nearshore
Syphon wave generator	Gedwardcook	Nearshore
Ocean wave air piston	green ocean wave energy	Nearshore
OWWE-ring	Ocean wave and wind energy	Nearshore
Seanergy wave	sea power ltd	Nearshore
Blue Power Energy	Blue power energy	Nearshore
Titan Platform	Grays harbour ocean energy	Nearshore
Wave Store	Portsmouth inoovation limited	Nearshore
Waveline magnet wave energy convertor (WM7)	Sea Wave energy ltd (SWEL)	Nearshore

## ANEXO II – Análise FMEA

Tabela 7.1 - FMEA do Subsistema Segurança e Sobrevivência

<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Severidad e</b>	<b>Ocorrênci a</b>	<b>Detecçã o</b>	<b>RPN</b>
Amarração	Fadiga na boia	7	4	3	84
	Corrosão	6	7	3	126
	Desancoragem (via mecânica)	9	9	1	81
Estação Meteorologica	Fadiga	4	2	3	24
	Corrosão	8	4	3	96
	Falha nos sensores	6	3	5	90
	Falha no software	6	3	5	90
GPS	Mau Balanceamento	4	4	6	96
	Falha nos sensores	6	3	5	90
	Falha no Software	6	3	5	90
	Corrosão	5	4	3	60
Comunicação	Mau Balanceamento	4	3	7	84
	Falha no Software	6	5	5	150
UPS	Mau Balanceamento	4	3	7	84
	Sobreaquecimento	3	2	2	12
	Contaminação	6	3	4	72
	Corrosão	5	2	3	30
	Falha no Software	6	5	5	150
Sensores	Mau Balanceamento	1	3	7	21
	Sobreaquecimento	3	2	2	12
	Contaminação	6	3	4	72
	corrosão	5	2	3	30
	Falha no software	6	3	5	90



Tabela 7.2 FMEA do Subsistema Estrutural

Componente	Falha	Severidade	Ocorrencia	Deteccção	RPN
Vedação	Corrosão	8	8	6	384
	Fadiga/ Desgaste	8	5	7	280
	Dano (via Mecânico)	9	6	8	432
Juntas	Corrosão	9	6	5	270
	Fadiga/ Desgaste	8	5	6	240
	Dano (via Mecânico)	7	5	7	245
Casco	Corrosão	8	8	7	448
	Fadiga/ Desgaste	8	6	6	288
	Dano (via Mecânico)	9	6	9	486
Instalação e transporte	Mau balanceamento	6	5	6	180
	Má projecção	9	3	7	189

Tabela 7.3 - FMEA do Subsistema PTO

Componente	Falha	Severidade	Ocorrencia	Deteccção	RPN
Tubo de distribuição	Entupimento	8	7	8	448
	Mau balanceamento	5	4	6	120
	Falha no filtro de ar	7	7	6	294
Cilindro hidraulico	Corrosão	6	7	8	336
	Desgaste	7	7	5	245
	Limites de trabalhos baixo	5	10	7	350
Gerador	Corrosão	6	9	8	432
	Sobreaquecimento	8	10	6	480
	Carbonização	9	10	7	630
	Fuga de óleo	8	10	7	560
	Fadiga / Desgaste	6	10	4	240
Acumulador	Pressão na precarga (alta ou baixa)	6	9	4	216
	Pre-carregamento acelerado	8	8	3	192
Motor	Sobrecarga	7	9	4	252
	Curto-circuito	8	8	3	192
	Vibrações	4	7	8	224

Tabela 7.4 - FMEA do Subsistema de Transmissão Eléctrica

<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Severidade</b>	<b>Ocorrência</b>	<b>Deteção</b>	<b>RPN</b>
Barra de Armazenamento	Curto Circuito	7	5	3	105
	Rompimento de cabos (via mecânica)	8	6	5	240
	Deformação na placa (via mecânica)	8	7	6	336
Disjuntor	Sobrecarga	9	9	3	243
	Curto-Circuito	9	9	3	243
	Falha na terra	7	7	2	98
	Más definições	6	8	6	288
Transformador	Involcro (dano mecânico)	7	5	7	245
	Comutador	8	8	6	384
	Má vedação dos tubos ( sistema de refrigeração)	8	6	7	336
	Falha no filtro de ar (sistema de refrigeração)	8	9	7	504
	Sistema de protecção (via mecânica)	7	7	7	343
	Curto-Circuito	8	8	3	192
	Sobrecarga	8	7	4	224
Cabo Umbilical	Rompimento de cabos (via mecânica)	7	6	6	252
	Corrosão	7	7	6	294
Cabos Submarinhos	Rompimento de cabos (via mecânica)	7	7	6	294
	Corrosão	7	8	6	336

# ANEXO III – FTA do sistema WEC

