



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

Metodologia para Otimização da Manutenção

JOÃO FILIPE DUARTE DOS SANTOS

(Primeiro Tenente, Marinha)

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

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutor Luís António de Andrade Ferreira

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Dezembro de 2015



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Metodologia para Otimização da Manutenção

JOÃO FILIPE DUARTE DOS SANTOS

(Primeiro Tenente, Marinha)

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

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio

Júri:

Presidente: Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais: Doutor Luís António de Andrade Ferreira

Doutor José Augusto da Silva Sobral

Dezembro de 2015

"Essentially, all models are wrong, but some are useful"

Box e Draper (1987)

Agradecimentos

Agradeço à Área Departamental de Engenharia Mecânica do ISEL pelo sentido de empreendedorismo na área da Manutenção em Portugal, criando o mestrado em Engenharia da Manutenção.

Agradeço ao professor José Sobral, ao professor João Calado, ao professor António Roque e aos meus colegas Hélio e Hugo pelo apoio e contributos para a participação na conferência MPMM em Agosto de 2014 em Coimbra, que em muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os militares embarcados na fragata NRP “Alvares Cabral” que em muito contribuíram para a motivação no desenvolvimento deste trabalho e à recolha dos dados necessários.

Agradeço ao Engenheiro Marques Correia pela ajuda na correção de texto.

Agradeço ao comando e aos chefes com quem servi na Marinha no decurso do meu mestrado, e que me proporcionaram a disponibilidade de realização do presente trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, professor José Sobral e Rui Chedas Sampaio pelo contributo prestado durante todo o período de desenvolvimento do trabalho e especialmente na fase de revisão do texto.

Agradeço especialmente à minha família por todo o apoio incondicional prestado.

Resumo

A disponibilidade dos ativos físicos assume um papel fundamental no cumprimento dos objetivos para a maior parte das organizações. Nesse sentido, a tomada das decisões tem que ser ponderada e assente em métodos consistentes. Quando o risco é um fator importante a considerar na tomada de decisão, devem ser identificados os modos de falha mais críticos e sobre eles fazer incidir uma maior atenção. A tomada de decisão assenta em baixar o risco determinado para esses modos de falha, atuando sobre a probabilidade de ocorrência das suas causas e/ou diminuindo a severidade das suas consequências. Muitas das vezes as medidas passam por aplicar técnicas de manutenção condicionada, que atempadamente permitam identificar uma falha potencial antes da sua ocorrência. O presente trabalho desenvolve a simulação dinâmica de um modelo através de um *software* de simulação. O modelo considera como variáveis de entrada a seleção de uma técnica de manutenção condicionada e a definição da sua periodicidade, apresentando como resultado da simulação o valor do risco alcançado e uma estimativa dos custos inerentes à decisão tomada. Para ensaio do modelo será utilizado um caso de estudo real, baseado na análise de um conjunto de equipamentos de um navio de guerra da Marinha Portuguesa. Com o modelo construído, serão simuladas várias decisões para encontrar a solução que permita um risco de falha aceitável da forma mais económica possível.

Palavras-chave: Otimização da manutenção; Simulação; Modelação; Manutenção com Base no Risco; Fiabilidade

Abstract

The availability of physical assets assumes a fundamental roll on the objective accomplishment for the majority of the organizations. In this sense, the decision-making have to be balanced and based on consistent methods. When risk is an important factor to take into account on decision-making, it should be identified the critical failure modes and focus upon them more attention. The decision-making is based on pull down the risk of the failure modes, acting on the probability of occurrence and/or reducing the severity from their consequences.

Frequently, the chosen measures to reduce risk from failure modes consist on the applicability of condition based maintenance techniques, which will identify in advance a failure before it occurs.

The present work develops the dynamic simulation of a formulated model using simulation *software*. The model takes as input variables the selection of a technique of condition based maintenance and its frequency. The results of the model will be the reached risk level and the cost of implementation of the chosen measures.

For the model test will be used a real case study, based on analysis of a group of equipment from a war ship from the Portuguese Navy.

With the developed model, different decisions are simulated to find the solution which allows an acceptable risk level in the most efficient way.

Keywords: Maintenance Optimization; Simulation; Risk Based Maintenance; Reliability

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Capítulo 1- Introdução	1
1.2. Estado da arte	3
1.3. Estrutura do trabalho	4
Capítulo 2 – Manutenção Baseada no Risco	5
2.1. Normativo e Terminologia na Manutenção.....	5
2.2. Estratégias de manutenção	7
2.2.1. Manutenção Corretiva	8
2.2.2. Manutenção Preventiva Sistemática.....	8
2.2.3. Manutenção Preditiva ou Condicionada.....	8
2.3. Manutenção Baseada no Risco.....	12
2.3.1. A Gestão do Risco.....	12
2.3.2. Metodologia RBM.....	14
2.3.3. Avaliação do risco.....	16
2.4. Metodologia FMEA e FMECA.....	16
2.5. Contributo da metodologia FMEA no RBM.....	19
2.6. Distribuições de probabilidade – Distribuição de Weibull.....	19
2.6.1. Determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull	21
Capítulo 3 – Modelação, Otimização e Simulação Dinâmica	23
3.1. Modelação	23
3.2. Otimização	24
3.3. Simulação.....	25
3.4. Seleção do programa de simulação	27
Capítulo 4 – Caso de Estudo	31
4.1. Descrição do Caso de Estudo.....	31
4.2. Aplicação do método RBM.....	33
4.2.1. Cálculo do risco.....	33
4.2.2. Avaliação do risco.....	37
4.2.3. Resultados	37

4.3.Construção do Modelo	38
4.4. Fase 1- Parâmetros de Simulação.....	41
4.4.1. Taxa de criação da falha.....	41
4.4.2. Porta lógica “Coincide?”	41
4.4.3. Porta lógica “Deteta?”	43
4.4.4. Custos das técnicas de manutenção.....	45
4.4.5. Construção das soluções de manutenção.....	46
4.5. Fase 2- Simulação	46
4.6. Fase 3- Resultados.....	49
4.6.1. Apresentação de Resultados.....	49
4.6.2. Análise de Resultados	52
Capítulo 5 – Conclusões.....	55
Referências	57
Anexos.....	61
Anexo A – Cálculo dos parâmetros de Weibull.....	62
Anexo B – Cálculo da probabilidade de Coincidência.....	72
Anexo C – Seleção de Técnicas de Manutenção.....	73

Índice de Figuras

Figura 1 - Curva P-F	7
Figura 2 - Matriz de criticidade.....	19
Figura 3 – Exemplo de modelo simulação Arena	29
Figura 4 - Fragata da classe "Vasco da Gama"	32
Figura 5 - Sequência de trabalho no caso de estudo.....	32
Figura 6 - Fluxograma do modelo construído para simulação dinâmica	40
Figura 7 - Módulo "Criar falha"	41
Figura 8 - Porta lógica "Coincide"	42
Figura 9 - Relação resultado vs número de ensaios	43
Figura 10 - Algoritmo de cálculo da probabilidade de coincidência.....	43
Figura 11 - Porta lógica "Deteta"	44
Figura 12 - Parâmetros de simulação ("Arena")	47
Figura 13 - Fluxograma de simulação Arena	47
Figura 14 - Módulo "MTTF".....	48
Figura 15 - Contador de falhas.....	48
Figura 16 - Exemplo de resultados Arena.....	49

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Modos de falha do caso de estudo.....	34
Tabela 2- Matriz de avaliação do índice de severidade.....	35
Tabela 3 - Atribuição do índice de severidade	35
Tabela 4- Cálculo do risco do caso de estudo	37
Tabela 5 - Índice de detetabilidade das técnicas	45
Tabela 6 - Custos de aplicação das técnicas de manutenção.....	46
Tabela 7 - Tabela resumo de parâmetros e resultados.....	50

Capítulo 1- Introdução

1.1. Enquadramento

Arunraj e Maiti (2006) afirmam que “O maior desafio de um engenheiro de manutenção, é implementar uma estratégia de manutenção que maximize a disponibilidade e a eficiência do equipamento, controle a taxa de deterioração do equipamento, assegure uma operação segura e ambientalmente amigável e ainda minimize o custo total de operação”. Muitas metodologias existem e outras novas estão a ser desenvolvidas para que os objetivos da otimização da manutenção sejam cumpridos, contribuindo para o sucesso das organizações.

De acordo com Khan e Haddara (2003), a manutenção com base no risco, em inglês *Risk Based Maintenance* (RBM), é uma metodologia de abordagem da manutenção recente e em desenvolvimento. Arunraj e Maiti (2006) colocam a manutenção com base no risco como uma metodologia de manutenção de ultima geração, em desenvolvimento desde 2000.

Entretanto Smith (2001) desenvolveu a obra *Reliability, Maintainability and Risk*, onde relaciona a otimização da manutenção com a gestão do risco. Nesta obra, o autor explica a origem do risco, afirmando que nenhuma atividade humana pode gozar de risco nulo, assim como nenhum equipamento pode ter taxa de avarias igual a zero. Por este motivo a possibilidade e a severidade das avarias tem que ser tomada em conta e assim tem sido desenvolvida tecnologia de segurança para reduzir o risco de falhas dos equipamentos. Assim sendo, o objetivo da RBM é balancear a redução do risco em benefício das atividades, considerando o custo desta redução (Smith, 2001). No final da abordagem RBM resultará a definição da melhor política de manutenção que permite reduzir o risco de falha para níveis aceitáveis, considerando o custo implícito das decisões tomadas.

Como em qualquer processo, a gestão da manutenção é suscetível a desperdícios. Um processo com desperdício pode sempre ser otimizado. Nesta linha de pensamento, a escolha de um plano de manutenção para reduzir o risco de falha de um equipamento deve ter em atenção a sua eficácia e o seu custo de implementação, que conjugados indicam a eficiência do plano.

Kumar e Maiti (2012) desenvolveram um estudo em que concluíram que de acordo com o risco de falha de um equipamento deve ser escolhida uma política de manutenção diferente. Os mesmos autores concluíram que para modos de falha com risco elevado a melhor política de manutenção seria a manutenção condicionada. Porém, como pode ser visto na obra de Mobley (2002) existem inúmeras

técnicas de manutenção condicionada, cada uma com a sua eficácia e os seus custos de implementação.

No presente trabalho é desenvolvido um estudo que apoiará a gestão da manutenção a selecionar as técnicas de manutenção condicionada mais eficientes, com o objetivo de reduzir o risco.

Mobley (2002) apresenta a manutenção condicionada como a política de manutenção mais apropriada para obter um plano de manutenção com menos risco. Torna-se então necessário selecionar as técnicas de manutenção condicionada mais eficazes e as suas respetivas periodicidades ótimas. Depois de selecionar algumas técnicas de manutenção condicionada e as respetivas periodicidades, o algoritmo construído, através do conhecimento do risco de falha inicial, fará a previsão da redução do risco. Assim, o decisor conseguirá analisar se é compensatório adotar as técnicas selecionadas.

Podemos assim ver que a manutenção com base no risco é uma ferramenta que contribui para o trabalho do engenheiro da manutenção. Permite otimizar a manutenção dos equipamentos que contribuem para a organização em que estão inseridos, melhorando a disponibilidade e reduzindo os custos. Importa agora apoiar a decisão na redução do risco, saber qual o melhor método de redução, qual a sua eficácia e qual o seu custo, são os objetivos que são apresentados de seguida.

1.2. Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho será utilizar uma ferramenta de simulação dinâmica que, conhecendo o risco inicial de falha dos equipamentos, conseguirá simular o impacto das decisões de manutenção tomadas no risco de falha. Para tal, será necessário construir um modelo que conhecendo o histórico de falhas do equipamento irá calcular o risco de falha inicial. O decisor introduzirá então as técnicas de manutenção condicionada que julgue adequadas, e assim o modelo apresentará os resultados, ou seja, o risco obtido e o custo previsto de implementação das técnicas selecionadas.

É assim possível ao decisor fazer a seleção das técnicas de manutenção condicionada mais eficientes, para alcançar um determinado nível de risco de falha considerado aceitável.

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, o mesmo será dividido em duas partes que serão depois conjugadas na aplicação de um caso de estudo:

- 1- A primeira fase do trabalho passa por perceber a metodologia da manutenção com base no risco (RBM) e a aplicação da metodologia num caso de estudo selecionado. Com a aplicação da metodologia RBM no caso de estudo será possível perceber o risco de cada um dos modos de falha dos equipamentos selecionados e avaliar quais os modos de falha com risco aceitável, tolerável ou inaceitável.

- 2- A segunda fase do trabalho passa por construir e simular um modelo, que permita ao decisor escolher técnicas de manutenção condicionada que consigam reduzir o risco de falha. Com base no histórico de falhas dos equipamentos selecionados no caso de estudo, será simulado o comportamento do sistema no futuro com as decisões tomadas. No final, é apresentado o risco corrigido depois de aplicadas as técnicas de manutenção selecionadas e um indicador que avalia a eficiência de cada decisão, para cada modo de falha.

As simulações das decisões no caso de estudo serão feitas com recurso a um *software* de simulação dinâmica, onde será simulado um modelo que permitirá ao utilizador conhecer o resultado das suas decisões e visualizar o impacto nos objetivos.

1.3. Estado da arte

Neste subcapítulo é apresentado o atual estado da arte relacionado com os objetivos deste trabalho, que servirá para enquadrar a investigação existente sobre a modelação e simulação de problemas de manutenção.

Vários autores investigam formas de modelar a degradação de sistemas para otimizar o intervalo de manutenções preventivas. Guo *et al.* (2013) desenvolvem um modelo para otimizar a política de manutenção preventiva. Neste trabalho os autores consideram um cenário em que um equipamento sofre uma degradação da sua condição de funcionamento. Quando se alcança um valor mínimo da condição de funcionamento do equipamento, este é intervencionado ou substituído. O resultado do trabalho é um modelo que otimiza o período de manutenção preventiva, baseado no processo de degradação de Wiener, com o objetivo de minimizar os custos. Para a resolução do problema apresentado pelos autores foi utilizada uma abordagem de otimização linear e assim foi obtida a solução ótima para o ciclo de manutenções preventivas.

Yang e Hsu (2010) para otimizarem o ciclo de manutenções a efetuar em pontes, consideram o risco de falha da ponte devido à deterioração da mesma e o custo de manutenções. Como variáveis de decisão têm o tipo de manutenções a fazer e o intervalo entre elas. Utilizam o algoritmo de otimização *Particle Swarm* e a simulação de *Monte-Carlo* para avaliar o impacto da decisão no risco de falha.

Nielsen e Sorensen (2012) desenvolvem um método de otimização de inspeções e manutenções a turbinas eólicas, com restrições nos custos de inspeção/manutenção e condições meteorológicas a variar ao longo do ano. Para a otimização utilizaram o processo de *Markov*, que permitiu modelar o sistema complexo que depende dos custos e da possibilidade de efetuar a manutenção. O algoritmo criado permitiu ainda simular no tempo os custos esperados. Porém, o processo de *Markov* tem a limitação de se basear no pressuposto que o futuro a prever não depende do passado observado, o

que não é compatível com processos de degradação, como é o caso da degradação de equipamentos reparáveis.

Noutro trabalho de investigação, foi desenvolvido uma metodologia para selecionar a melhor política de manutenção para uma unidade industrial (Kumar & Maiti, 2012). Para a modelação do problema os autores utilizam um processo de rede analítica *fuzzy*. Este método de modelação reúne as opiniões de especialistas no equipamento e seleciona a melhor política de manutenção, tendo em conta o custo das manutenções e o risco de falha do equipamento. Os autores concluíram neste estudo que a manutenção condicionada é a política de manutenção adequada para quando o risco de falha é elevado. Segundo os autores, a manutenção corretiva adequa-se quando o risco de falha é baixo e a maior preocupação é o custo de manutenções. Se o objetivo é a redução do custo das manutenções assim como o risco de falha a política mais adequada é a manutenção preventiva sistemática.

Sarker e Haque (2000) desenvolveram um trabalho de investigação para otimizar o *stock* de sobresselentes em função da política de manutenção adotada. Como a modelação matemática do sistema seria demasiado complexa, houve a necessidade de desenvolver uma simulação de resultados através do *software* de simulação SIMSCRIPT II.5.

Da análise do estado da arte verifica-se que existe um défice de investigação quanto à utilização das ferramentas de simulação dinâmica enquanto método de avaliação de decisões de manutenção. A simulação dinâmica poderá ser útil quando se torna difícil modelar matematicamente os sistemas estocásticos com acontecimentos imprevisíveis, tal como é o caso das falhas de um equipamento.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. O capítulo 1 introduz o tema direcionando para os objetivos propostos, e faz um levantamento do estado da arte, reunindo uma análise da investigação existente na literatura sobre o tema em análise. No capítulo 2 são definidas as bases para o trabalho, com a apresentação de terminologia da manutenção. São abordadas as diferentes estratégias de manutenção existentes e no final é apresentada a metodologia de manutenção com base no risco com apoio da ferramenta FMEA. O capítulo 3 introduz o leitor na construção de modelos, otimização de problemas e culmina com a descrição do processo de simulação como ferramenta de otimização e apresenta a ferramenta informática utilizada no trabalho para simular o modelo construído. O capítulo 4 aplica o conhecimento reunido num caso de estudo real. No final do capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos. No capítulo 5 é feita a conclusão com a análise da utilidade do modelo construído para os problemas reais de otimização da manutenção e melhoria da disponibilidade de equipamentos.

Capítulo 2 – Manutenção Baseada no Risco

2.1. Normativo e Terminologia na Manutenção

Desde a revolução industrial no início do século XIX, a importância dos ativos físicos na indústria tem crescido. Com a globalização, a concorrência entre empresas deixou de ser de escala local e passou a mundial, quebrando fronteiras. A junção destes dois acontecimentos relativamente recentes tem feito desenvolver a investigação relativa à gestão de ativos físicos, como máquinas industriais e meios de transportes.

Brigas (2008) faz um levantamento da evolução da manutenção desde a revolução industrial, passando pela época da manutenção preventiva baseada no tempo, até às recentes metodologias da manutenção baseada na fiabilidade e no risco. Esta evolução demonstra o desenvolvimento de novas metodologias de manutenção ao longo do tempo.

Com a globalização do tema e a aplicação na indústria, surgiu recentemente a necessidade de normalizar a terminologia na gestão de ativos físicos. Em 2014 a organização *International Organization for Standardization* (ISO) publica as normas da série 55000, baseadas no sucesso das normas PAS55 produzidas pela *British Standards Institution's* (BSI) que descreviam procedimentos para otimização da gestão de ativos físicos durante todo o ciclo de vida dos mesmos (The Woodhouse Partnership Ltd, 2015). O processo de gestão dos ativos físicos definido na norma ISO 55000 permite às organizações alcançarem os seus objetivos, aproveitando o valor acrescentado disponibilizado pelos seus ativos físicos (ISO - International Organization for Standardization, 2014).

Paralelamente, em Portugal foram sendo publicadas Normas Portuguesas (NP) com diretivas para a normalização da terminologia e estratégias de manutenção, nomeadamente:

- Terminologia da manutenção – NP EN 13306:2007;
- Guia para a implementação do sistema de gestão da manutenção – NP 4483:2009;
- Indicadores de desempenho da manutenção (KPI) – NP EN 15341:2009;
- Requisitos para a prestação de serviços de manutenção – NP 4492:2010.

No âmbito do presente trabalho, foram analisadas as normas de relevo para o desenvolvimento do mesmo. É de seguida apresentada uma análise da terminologia necessária para o entendimento do trabalho, baseado no normativo anteriormente descrito.

A terminologia é uma pedra basilar para o desenvolvimento de qualquer investigação ou doutrina sobre gestão da manutenção. Devido às variadas fontes existentes, existe a necessidade de normalizar os termos a utilizar. Desta forma, serão analisados os termos apresentados pela norma NP EN 13306 (2007), sendo estes vinculativos para o desenvolvimento do presente trabalho (Instituto Português da Qualidade (2007)).

- Manutenção: “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida.”
- Gestão da manutenção: “Todas as atividades de gestão que determinam os objetivos, a estratégia e as responsabilidades respeitantes à manutenção e que os implementam por diversos meios tais como o planeamento, o controlo e supervisão da manutenção e a melhoria de métodos na organização, incluindo os aspetos económicos.”
- Função requerida: “função ou uma combinação de funções de um bem, consideradas como necessárias para fornecer um dado serviço.”
- Avaria: “cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida”. Depois da avaria o bem poderá estar em falha, total ou parcial, sendo que a avaria é um acontecimento e a falha é um estado.
- Causa de avaria: razão que origina a avaria.
- Mecanismo de avaria: “processos físicos, químicos ou outros, que conduzem ou tenham conduzido a uma avaria”.
- Em falha: “estado de um bem inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devida à manutenção preventiva ou outras ações programadas, ou devida à falta de recursos externos”.
- Em falha parcial: “estado de falha que pode permitir ao bem cumprir algumas, mas não todas as funções requeridas.”. Em alguns casos poderá ser possível utilizar o bem com desempenho limitado.
- Modo de falha: “maneira pela qual é verificada a incapacidade de um bem para cumprir uma função requerida”

Sobre o modo de falha, Moubray (1997) refere que o modo de falha é um evento que conduz à falha funcional. Conhecendo o modo de falha, a equipa de manutenção sabe quais as medidas que deve tomar para evitar a falha, ou seja evitar o evento “modo de falha”. O mesmo autor define falha funcional como a incapacidade de um ativo cumprir com os

requisitos de desempenho definidos pelo utilizador. Sendo que um ativo pode ter várias funções atribuídas, então, pode ter várias falhas possíveis, uma para cada função esperada. Desta forma é compreensível que é mais correto esperar uma falha para cada função do equipamento.

- Falha potencial e falha funcional: A distinção entre a falha potencial e a falha funcional é importante para a compreensão deste trabalho. Desde cedo que vários autores distinguem estes tipos de falhas.

Nowlan e Heap (1978) descrevem falha como “uma condição não satisfeita”. Sendo que a falha funcional é a “incapacidade de um equipamento de cumprir um requisito específico de funcionamento” e uma falha potencial é “uma condição física identificável que indica que uma falha funcional está eminente”.

Rui Assis (2010) aborda os mesmos conceitos de falha funcional e falha potencial, representando o intervalo de tempo que ocorre entre as duas falhas (período de degradação) pela curva P-F. A manutenção condicionada pretende detetar a falha potencial na curva de degradação, antes da ocorrência da falha funcional. A figura 1 mostra a curva de degradação P-F típica de um equipamento reparável.

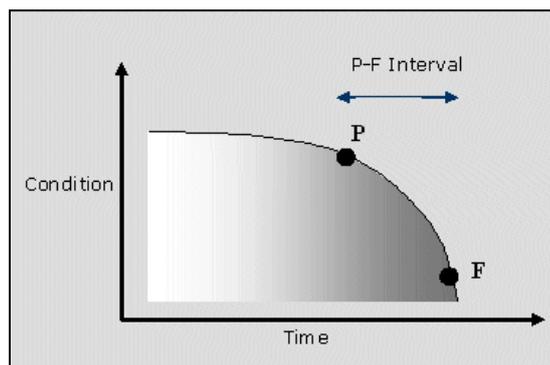


Figura 1 - Curva P-F (ReliaSoft Corporation, 2007)

2.2. Estratégias de manutenção

Para a construção e simulação de um modelo que optimize a manutenção, as ferramentas disponíveis para o engenheiro da manutenção são as diversas políticas de manutenção que existem. Essencialmente existem duas políticas de manutenção, a manutenção corretiva ou *run-to-failure* e a manutenção preventiva. Dentro destas duas vertentes existem várias formas de alcançar os seus objetivos.

Neste ponto do presente capítulo serão analisadas as políticas de manutenção existentes e as técnicas que lhe estão associadas.

2.2.1. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva existe desde a operação da primeira máquina industrial. Esta filosofia de manutenção não tem qualquer custo até à falha. É uma manutenção reativa e por isso apresenta custos elevados de gestão de *stock* de sobresselentes, custos elevados com mão-de-obra fora de horas e elevados períodos de paragem por avaria, provocando baixa produtividade. Mobley (2002) considera a manutenção corretiva como a estratégia de manutenção mais cara. Segundo o mesmo autor o custo da manutenção corretiva é em média três vezes maior que a manutenção preventiva, por esta última ser planeada e ter assim tempo de reparação menor e consecutivamente menores custos.

2.2.2. Manutenção Preventiva Sistemática

Há uma característica na estratégia de manutenção preventiva sistemática que a distingue das outras, é que é baseada no tempo. Esta estratégia de manutenção pressupõe uma calendarização das intervenções de manutenções a efetuar numa máquina. O tempo entre intervenções pode ser medido em dias de calendário, horas de funcionamento, ciclos de arranque ou ciclos de carga, desde que seja cíclico e indicador do estado do equipamento e consecutivamente da necessidade de manutenção.

O grande problema desta estratégia é que é baseada no pressuposto de que os equipamentos têm todos um comportamento de tempo entre falhas próximo do tempo estimado. Este pressuposto induz em falhas inesperadas se a manutenção for planeada tarde de mais ou em manutenções desnecessárias e custos aumentados se a manutenção for planeada cedo de mais (Mobley, 2002).

2.2.3. Manutenção Preditiva ou Condicionada

Mobley (2002) estima que um terço dos custos totais com manutenção, sejam desperdiçados em manutenções desnecessárias. A principal causa desta ineficiência é a falta de dados para quantificar exatamente se um equipamento necessita ou não de manutenção. O autor profetiza que o desenvolvimento dos microprocessadores de hoje em dia e a instrumentação baseada em computadores, trará a possibilidade de monitorizar permanentemente as condições de operação de vários equipamentos e assim obter mais e melhores dados por forma a contribuir para uma manutenção preditiva condicionada, evitando manutenções desnecessárias e falhas catastróficas.

A grande premissa da manutenção preditiva, é que é baseada na monitorização regular de indicadores das condições de operação de uma máquina, com vista a recolher dados que permitam maximizar o intervalo entre manutenções e assim reduzir o número de intervenções inesperadas criadas por falhas.

A manutenção preditiva pretende então conhecer o estado da instalação suficientemente bem, para conseguir planear as intervenções de manutenção. Para tal, deverão ser aplicadas as técnicas mais eficazes de controlo de condição (Mobley, 2002).

Das ferramentas de análise de condição que suportam a manutenção preditiva, Mobley (2002) apresenta cinco:

1. Monitorização de vibrações;

A maioria dos equipamentos industriais são eletromecânicos, ou seja, transformam energia elétrica em movimento mecânico. A análise de vibrações é a técnica mais consensual no que toca à análise de sistemas dinâmicos. Desta forma, é expectável que para sistemas dinâmicos seja a técnica que demonstra maior detetabilidade.

Esta técnica deve ser aplicada por operadores especializados e treinados na área. Existem por vezes dificuldades na interpretação dos dados pelo que devem ser conjugados por uma análise crítica da máquina no local. Esta análise carece experiência no tipo de equipamento em análise.

2. Monitorização de parâmetros de funcionamento;

A falha funcional, conforme definido no capítulo de terminologia, ocorre quando um equipamento não consegue cumprir com a sua função. Assumindo que o período de falha decorre entre a ocorrência da falha potencial até à falha funcional, a máquina sofre uma degradação da sua função, ou seja dos seus parâmetros de funcionamento. Desta forma, a monitorização destes parâmetros permite identificar o período de degradação da máquina, que nos pode indicar a existência de uma falha potencial e planear uma intervenção ou complementar com outras técnicas, antes da falha funcional.

A incorporação da monitorização de parâmetros de funcionamento na política de manutenção, deve ser analisada caso a caso. Por vezes obriga a um investimento na instalação de aparelhos de medida, leitura e registo, outras vezes apenas com os aparelhos de medida instalados os operadores conseguem fazer a leitura e o registo. A eficácia desta técnica dependerá do grau de indicação da eficiência da máquina através dos parâmetros seleccionados. Parâmetros mal escolhidos podem não indicar degradação antes da falha, ou então já muito perto da falha.

3. Termografia;

O princípio de funcionamento da termografia é a visualização da emissão de radiação de infra vermelho emitida pelo objeto a observar. É possível correlacionar esta emissão de radiação com a temperatura da superfície observada e assim perceber a condição do objeto ou equipamento. Através da identificação de anomalias térmicas, como pontos quentes ou anormalmente frios, são identificadas falhas potenciais.

O princípio de funcionamento da termografia baseia-se no pressuposto de que, quando existem forças dinâmicas anormais e prejudiciais à máquina, estas criam pontos térmicos. Por outro lado, quando há princípios de falhas elétricas estas criam igualmente pontos

térmicos. Desta forma, é perceptível que a termografia seja uma boa técnica tanto na análise de equipamentos estáticos, como de equipamentos dinâmicos.

Porém, é expectável que a termografia não seja tão eficaz como a análise de vibrações em componentes dinâmicos, por encontrar a falha potencial num estado de degradação mais perto da falha funcional.

4. Análise de óleos;

A tribologia, de acordo com Carinhas (2010), “é a ciência e tecnologia das superfícies interactuantes e em movimento relativo, e das matérias e métodos com elas relacionados”. Porém, Mobley (2002) atribui a definição de tribologia para definir um conjunto de ferramentas de análise de condição de equipamentos na medida em que, permitem avaliar as características de um lubrificante para caracterizar o estado do lubrificante e do equipamento. Neste trabalho, por ser um termo mais consensual na área da manutenção, serão denominadas de “análise de óleos” às técnicas de avaliação de condição que utilizem análises do óleo lubrificante como ferramentas de avaliação de condição.

As técnicas de manutenção condicionada associadas a esta disciplina da engenharia resumem-se essencialmente a duas: análise a óleos de lubrificação e análise da existência de partículas de desgaste no óleo de lubrificação.

A análise das propriedades químicas de óleos de lubrificação permite apenas conhecer o estado do óleo, fazendo uma análise das propriedades que este apresenta. O resultado desta análise serve para saber se é necessário ou não substituir o óleo.

A análise das partículas sólidas existentes em suspensão numa amostra de óleo, ao contrário da análise de óleo, não indica o estado do óleo mas indica o estado da máquina. A análise do tamanho, forma, composição e quantidade das partículas pode indicar uma falha potencial na máquina.

Nas limitações desta técnica, há a considerar o custo de aplicação, a qualidade da amostra recolhida e a interpretação da informação. Contudo, em máquinas complexas demais para analisar com vibrações ou termografia, verifica-se uma boa técnica de controlo de condição, como é o caso de caixas redutoras, motores de combustão interna, ou outros mecanismos com inúmeros componentes móveis de difícil acesso.

5. Inspeção visual.

A inspeção visual foi a primeira técnica de manutenção condicionada a ser utilizada. Desde os primórdios da revolução industrial, que os técnicos de manutenção faziam uma ronda diária para identificar visualmente falhas potenciais nos equipamentos (Mobley, 2002).

Atualmente a inspeção visual ainda pode ser um bom indicador da condição de um equipamento e deve ser uma técnica a utilizar sempre que um técnico aborda o equipamento, mesmo que seja apenas para operar a máquina ou desenvolver qualquer tipo de manutenção.

A inspeção visual pode ser efetuada com ou sem instrumentos de inspeção. Pode ser feita com os sensores humanos do operador, ou com auxílio de instrumentos de indicação e leitura como indicadores de temperatura, pressão, nível e outros.

Na prática a inspeção visual é muito mais do que isso, é mais uma inspeção sensorial, visto que são utilizados todos os seus sensores do ser humano para detetar várias anomalias, podendo perceber por intuição o surgimento de uma falha. Esta técnica denomina-se na utilização prática geral como inspeção visual por tradição e assim será denominada neste trabalho. Devem ser considerados os sentidos humanos possíveis de utilizar: visão, audição, tato e olfato. A experiência de observação irá apurar a capacidade de deteção de falhas.

Os sentidos humanos têm a limitação de não perceberem pequenas variações dos parâmetros que muitas vezes podem indicar o início de degradação de uma máquina. Nestes casos, os indicadores analógicos ou digitais podem apoiar o operador a perceber o estado da máquina. Neste trabalho, será considerada inspeção visual qualquer inspeção à máquina com sensores humanos do operador assim como a verificação dos parâmetros básicos dos indicadores que se encontram permanentemente instalados na máquina e indicam parâmetros básicos como pressões, temperaturas ou níveis.

6. Outras técnicas:

1. Ultrassons

A técnica de ultrassons é considerada por vários autores como uma vertente da análise de vibrações. A técnica é em tudo semelhante, mas o espectro de frequências captadas é bastante mais elevado, acima de 30.000Hz. Esta técnica é especialmente útil para detetar fugas de gases ou líquidos (Mobley, 2002).

2. Medições elétricas

Nas medições elétricas, a mais comum e muitas vezes utilizada em paralelo com a análise de vibrações são as medições de resistências de isolamento. Este teste injeta uma corrente ou tensão (variando a escala de resistência a medir) para verificar se existe um isolamento ou passagem franca à massa no circuito. Este teste é útil para verificar a integridade dos enrolamentos dos motores elétricos. É um teste simples e permite ser desenvolvido por operadores dotados com o equipamento certo.

Tendo em conta que no presente trabalho se pretende reduzir o risco dos modos de falha que apresentam risco elevado, e que conforme descrito no capítulo introdutório a manutenção condicionada é a melhor política para equipamentos com risco de falha elevado, no presente trabalho será simulada a aplicação das técnicas de manutenção condicionada atrás apresentadas para reduzir o nível de risco dos modos de falha em análise.

2.3. Manutenção Baseada no Risco

Smith (2001) atribui à década de 1970 o surgimento das preocupações quanto aos perigos inerentes ao crescimento da complexidade das plataformas industriais e à criticidade dos acidentes provocados por falhas. Nesta altura surgem metodologias para quantificar a severidade das falhas para que sejam tomadas medidas que tornem as instalações mais seguras e fiáveis.

2.3.1. A Gestão do Risco

De acordo com a norma ISO 31000 (2009), que estabelece os princípios e as linhas de orientação para a gestão do risco, todas as organizações estão sujeitas a fatores internos ou externos, que influenciam os seus resultados e fazem com que exista incerteza quanto ao alcance dos seus objetivos. Esta incerteza é quantificada pelo risco. Quaisquer atividades nas organizações têm um nível de risco a quantificar. A gestão do risco passa por identificar, analisar e avaliar se é necessário reduzir o risco para cumprir com os critérios de aceitação estabelecidos.

A norma acima referida aborda a gestão de qualquer atividade de uma organização generalista. Contudo, importa no âmbito deste trabalho esclarecer alguns conceitos estabelecidos nesta norma, nomeadamente:

- Risco: “efeito da incerteza nos objetivos. O risco é caracterizado pela combinação da consequência de um evento e a probabilidade de ocorrência, associada a esse evento”;
- Efeito: “desvio do objetivo esperado, que pode ser positivo ou negativo”;
- Consequência: “efeito de um evento, afetando os objetivos”;
- Probabilidade: “hipótese de algo acontecer”;
- Evento: “ocorrência ou alteração de um conjunto particular de circunstâncias”.

A gestão do risco, definida na norma ISO 31000 (2009), é uma ferramenta de apoio à decisão na gestão de topo das organizações. Permite otimizar a gestão de recursos, direcionando para os objetivos assumidos. A norma define o processo de gestão de risco nas seguintes etapas:

1. Comunicação e consulta

O processo de comunicação envolve toda a organização na missão da gestão do risco. O processo de identificação dos riscos, e depois o processo de correção, carece do contributo de todos os colaboradores das organizações.

2. Definição do contexto

Neste passo, a organização define os seus objetivos, assim como o âmbito e o critério de risco, necessário para o resto do processo.

3. Análise do risco

A análise do risco é descrita na norma ISO 31010 (2009) ao pormenor. Este passo é composto por três fases distintas:

1. Identificação do risco:

Procedimento de identificar e listar todas as fontes de risco. São considerados fontes de risco os eventos que ocorrendo terão impacto nos objetivos definidos.

2. Estimativa do risco:

Nesta fase é quantificada a severidade e a probabilidade de ocorrência de cada fonte de risco.

Para estimar o risco pode ser selecionado um dos três métodos seguintes: método qualitativo, semi-quantitativo ou quantitativo. A decisão do método irá depender da quantidade de dados disponíveis para estimar o risco.

O método qualitativo atribui o risco a um evento de acordo com uma escala qualitativa, utilizando descritores como "alto", "médio" ou "baixo".

No método semi-quantitativo a escala utilizada é numérica, mas a decisão de qual o valor a atribuir ainda é dependente do avaliador do risco.

No método quantitativo, os valores da consequência e probabilidade de ocorrência, são quantificados com métodos numéricos baseados em registos históricos.

3. Avaliação do risco

Nesta fase é confrontado o risco obtido, com o critério de aceitação estabelecido. Com esta avaliação são catalogados os eventos de risco nos seguintes três níveis:

- Risco intolerável: a redução do índice de risco é necessária, independentemente do custo. Normalmente são eventos que afetam severamente o cumprimento dos objetivos ou a segurança.
- Risco moderado: a redução do índice de risco é função da relação custo e benefício.
- Risco aceitável: o risco é negligenciável, o tratamento do risco não é imperativo.

4. Tratamento do risco

No tratamento do risco, pretende-se reduzir o risco global para níveis aceitáveis. Para tal, são tomadas decisões para reduzir o índice de risco dos eventos, que contribuem para elevar o risco global.

5. Monitorização e revisão

A monitorização e revisão fecham o ciclo do plano de gestão do risco. Esta fase permite avaliar a implementação das medidas e garantir que o procedimento está implementado e é eficaz.

2.3.2. Metodologia RBM

A gestão do risco analisada no ponto anterior é transversal a qualquer organização e dentro das organizações a qualquer atividade. Sendo a manutenção uma atividade das organizações que gerem o ciclo de vida de equipamentos, foi adaptada a gestão do risco a esta atividade e resultou a metodologia de otimização da manutenção com base no risco (RBM).

A metodologia de manutenção com base no risco, em comparação com outras metodologias de otimização da manutenção, permite concentrar esforços da organização nos equipamentos que realmente podem provocar impacto no objetivo desta. Esta metodologia aproxima a função de manutenção ao objetivo da organização onde os ativos estão inseridos, e é esta a grande mais valia da metodologia RBM em comparação com outras metodologias.

Vários autores utilizaram diferentes metodologias de RBM, e todas recaem sobre os pontos fundamentais da gestão do risco. Neste capítulo, serão apresentadas as abordagens RBM mais consensuais entre os autores de referência da literatura.

O objetivo fundamental da RBM é selecionar técnicas de manutenção que minimizem o risco de falha de um equipamento (Krishnasamy *et al.*, 2005). Aplicando este objetivo na teoria de gestão do risco normalizada pela ISO 31000, e relacionando com a norma que define a terminologia da gestão da manutenção (NP EN 13306), pode-se considerar que o “evento” corresponde à “cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida” e o “objetivo” estabelecido pela organização é a de manter o ativo num “estado em que ele pode desempenhar a função requerida”. A partir desta premissa, as organizações que adotam a metodologia RBM na gestão dos seus ativos procuram encontrar formas diferentes de gerir o risco de falha dos equipamentos.

Krishnasamy *et al.* (2005), utilizam a metodologia RBM para definir um plano de manutenção que permita reduzir o risco de falha. A sua metodologia assenta nos seguintes passos:

1. Decomposição do equipamento. Neste passo é decomposto o equipamento a analisar em sistemas, estes em subsistemas e estes em componentes. O autor utiliza uma árvore de falha para este passo, mas existem outras técnicas possíveis, como a metodologia FMEA descrita à frente.
2. Avaliação do risco. Depois de decomposto o equipamento, importa identificar os modos de falha possíveis para cada componente. São posteriormente quantificados os diferentes fatores

de cálculo do risco e o risco em si.

- a. Calcular a probabilidade de cada modo de falha (P);
 - b. Determinar a consequência de cada modo de falha (C);
 - c. Calcular o risco, que passa por encontrar o produto $P \times C$.
3. Análise do risco. Depois de determinado o critério de aceitação do risco, são filtrados os componentes com risco de falha fora do intervalo aceitável.
 4. Planeamento da manutenção. Conhecendo os componentes onde é necessário intervir, é redesenhado o tipo e intervalo de tempo entre manutenções para o equipamento.

Estes passos encaixam na descrição que a norma de gestão do risco define, porém adaptados à tarefa / objetivo de manter um equipamento em funcionamento.

Arunraj e Maiti (2006) apresentam uma metodologia RBM que se divide em duas fases principais: 1: Análise do risco; 2: Planeamento da manutenção com base no risco. Em que a análise do risco se divide nas seguintes “sub-fases”:

1. Identificação dos modos de falha;
2. Cálculo da probabilidade de ocorrência de cada modo de falha;
3. Quantificação da severidade para cada modo de falha; Existem várias metodologias para quantificar a severidade. Os autores consideram o fator severidade subdividido em diferentes fatores: afetação no desempenho, impacto no ambiente, afetação na saúde;
4. Cálculo do risco;
5. Avaliação do risco.

Finalmente é feito o planeamento da manutenção com vista a reduzir o risco dos modos de falha cujo risco exceda o valor máximo admitido.

O método de determinação do risco quantitativo deverá ser utilizado apenas quando é razoável e prático, ou seja, quando o fim justifique os meios. O método qualitativo é indicado para ser utilizado quando o risco é controlado e bem conhecido. Neste método, a quantificação é feita com análise de matrizes que combinadas dão um índice de risco.

Khan e Haddara (2003), apresentam uma metodologia RBM quantitativa onde dividem o processo em três fases gerais:

1. Cálculo do risco. Nesta fase são identificados os modos de falha, e é estimado o valor do risco nos mesmos moldes das metodologias apresentadas anteriormente, ou seja, com o produto da consequência pela severidade;

2. Avaliação do risco. Depois de quantificado o risco, é definido o critério de aceitação e à semelhança dos outros métodos, identificam-se os modos de falha não aceitáveis;
3. Planeamento da manutenção. Este é o último patamar, que depende da quantificação anteriormente feita. Neste passo é adotada uma política de manutenção que minimize o risco.

A metodologia desenvolvida por Khan e Haddara (2003) foi a utilizada no desenvolvimento deste trabalho, pela sua facilidade de aplicação visto agregar vários passos em três grandes fases e por ter sido já utilizada em trabalhos anteriores.

2.3.3. Avaliação do risco

Depois de conhecido o risco de um acontecimento, é necessário definir o nível de risco que estamos dispostos a aceitar, aquele que temos que reduzir avaliando o custo e aquele que temos que reduzir independentemente do custo.

Smith (2001) identifica os três patamares de risco mais utilizados pelos diferentes autores e definidos na norma ISO 31000:

- Risco aceitável: Não serão desenvolvidos grandes esforços na redução deste risco;
- Risco tolerável: Poderão não ser desenvolvidas atividades para reduzir no imediato, mas o risco terá que ser monitorizado e deverá ser reduzido no longo prazo;
- Risco inaceitável: Não será permitido este nível de risco e serão tomadas medidas para o reduzir ou parar a atividade.

2.4. Metodologia FMEA e FMECA

A ferramenta *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA) permite fazer um apoio à decisão identificando os modos de falha de um sistema e fazendo uma avaliação da criticidade de cada modo de falha em relação aos objetivos definidos. Existe uma versão da FMECA simplificada, a *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), em que a criticidade não é avaliada e o objetivo principal é a identificação dos modos de falha e os seus efeitos no objetivo do sistema. No âmbito deste trabalho será utilizada a metodologia FMEA para a listagem dos modos de falha, sendo que a criticidade de cada um será avaliada na metodologia de manutenção com base no risco.

Wang *et al.* (2012) abordam a metodologia FMEA como uma ferramenta para identificar e avaliar como potenciais falhas podem afetar o desempenho de um processo. Para tal, os autores utilizam esta metodologia para identificar cada modo de falha e quantificar os respetivos riscos. Na metodologia apresentada os autores consideram que a severidade contabiliza o impacto na segurança do pessoal, no ambiente e nas perdas económicas. A severidade é quantificada utilizando matrizes de análise

semi-quantitativa. Sendo a ocorrência quantificada com a probabilidade de falha de cada modo de falha, os autores utilizam então um método misto semi-quantitativo.

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, atento às vantagens da utilização de ferramentas FMECA e FMEA na gestão do ciclo de vida dos seus equipamentos, publicaram uma norma com diretrizes para a organização aplicar estes conceitos na gestão do material, a norma MIL STD 1629A (Department of Defense - USA, 1980). Atualmente esta norma está descontinuada e não terá mais revisões, porém continua a ser uma boa referência da temática e os procedimentos apresentados continuam válidos. Na terminologia apresentada neste normativo consta a seguinte distinção entre FMEA e FMECA:

- FMEA: “Procedimento onde é analisado cada modo de falha de um sistema para determinar o efeito no sistema e classificar cada modo de falha de acordo com a sua severidade”;
- Análise de criticidade (CA): “Procedimento onde cada modo de falha é categorizado de acordo com o resultado da combinação entre severidade e probabilidade de ocorrência”.

A norma MIL STD 1629A separa as tarefas FMEA e FMECA, apresentando como objetivo da FMEA identificar todos os modos de falha de um sistema, uma severidade da sua falha e indicar medidas corretivas para reduzir ou controlar o nível de risco de afetação na missão a desempenhar.

Para desenvolver a metodologia FMEA, a norma MIL STD 1629A descreve os seguintes passos:

1. Descrever o sistema a avaliar. Identificar as funções do sistema, desempenho esperado e definição de falha. É importante clarificar os requisitos espectáveis do sistema e balizar o desempenho esperado. Conforme demonstrado por Santos *et al.* (2014b), o ambiente de operação influencia a avaliação da severidade das falhas;
2. Construir um diagrama de blocos para conhecer o sistema e as interdependências entre os seus constituintes;
3. Identificar todos os componentes do sistema e os seus potenciais modos de falha;
4. Avaliar cada modo de falha e caracterizar a sua pior consequência, que resultará na classificação da severidade;
5. Identificar medidas para detetar as falhas;
6. Identificar medidas corretivas para eliminar ou controlar o risco de falha.

A decomposição do sistema em análise é um passo fundamental na metodologia FMEA. A norma MIL STD 1629A apresenta duas abordagens de decomposição de sistemas. Existe a abordagem dos equipamentos (*hardware approach*), utilizada quando existem esquemas claros de todos os componentes do equipamento. A outra abordagem é a funcional (*functional approach*), em que é normalmente utilizada em sistemas complexos. Esta abordagem permite fazer uma decomposição de cima para baixo, até ao nível de decomposição pretendido.

A severidade é a base da análise FMEA. A classificação da severidade de cada modo de falha avalia de forma qualitativa a medida em que a falha afeta o objetivo do sistema. As categorias de severidade apresentadas na norma MIL STD 1629A são:

1. Categoria 1: Catastrófico - Falhas que possam provocar mortes;
2. Categoria 2: Crítico – Falha que pode provocar lesões graves, danos materiais graves ou danos graves no sistema, e que resulta no não cumprimento do objetivo;
3. Categoria 3: Marginal – Falha que pode provocar lesões mínimas, poucos danos materiais e poucos danos no sistema;
4. Categoria 4: Menor – Falha que não é séria o suficiente para provocar lesões ou danos.

A análise da criticidade de cada modo de falha é uma tarefa acrescentada pela análise FMECA à metodologia FMEA. Nesta análise, além de atribuir um índice de severidade a cada modo de falha identificado na análise FMEA, é avaliada a probabilidade de ocorrência com base na recolha de dados de cada modo de falha e atribuído um índice de ocorrência (Department of Defense – USA, 1980).

A análise FMECA tem duas abordagens possíveis, qualitativa ou quantitativa (Department of Defense – USA, 1980). Sendo a qualitativa utilizada quando não existem dados suficientes para determinar analiticamente o índice de ocorrência.

Para a análise qualitativa da ocorrência, à semelhança da severidade, existem patamares pré-definidos que caracterizam o índice de ocorrência de cada modo de falha.

- Nível A - Frequente: É um modo de falha com alta probabilidade de ocorrência. Equivale a uma ocorrência com probabilidade superior a 20% (no tempo de observação definido);
- Nível B - Razoavelmente provável: É um modo de falha com probabilidade moderada de ocorrência. Equivale a uma ocorrência com probabilidade entre 10 e 20%;
- Nível C – Ocasional: É um modo de falha com probabilidade ocasional. Equivalente a uma ocorrência com probabilidade entre 1 e 10%;
- Nível D – Remoto: É um modo de falha pouco provável de acontecer. Equivale a uma ocorrência com probabilidade entre 0.1 e 1%;
- Nível E – Extremamente improvável: É um modo de falha com probabilidade de ocorrência muito próxima de zero. Equivale a uma probabilidade de ocorrência menor que 0.001%.

A matriz de criticidade representada na figura 2 permite visualizar a relação entre severidade e ocorrência definida na análise FMECA (Department of Defense – USA, 1980).

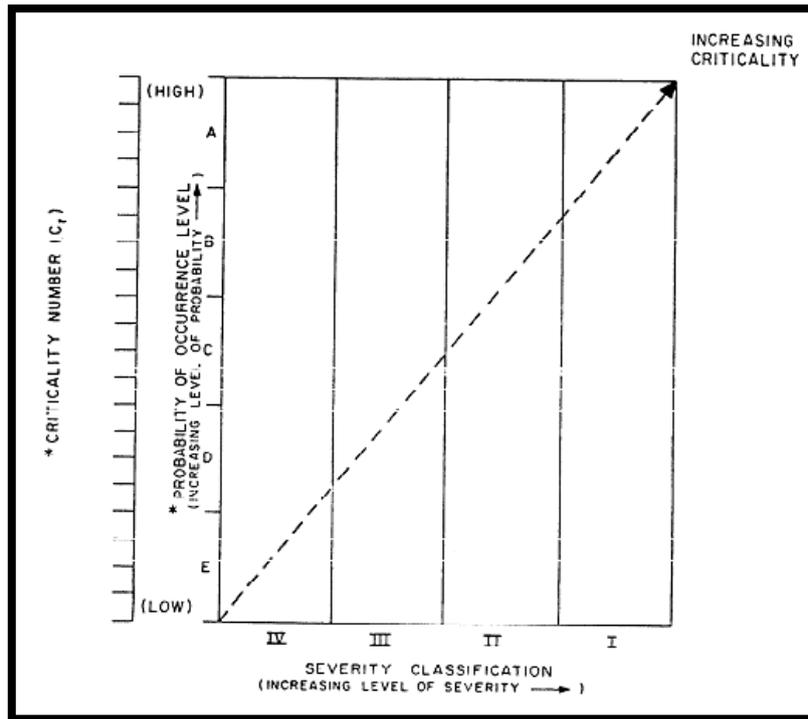


Figura 2 - Matriz de criticidade (Department of Defense – USA, 1980)

2.5. Contributo da metodologia FMEA no RBM

A metodologia FMEA, conforme apresentado neste capítulo, encaixa na metodologia RBM na fase de identificação dos possíveis acontecimentos que terão impacto no objetivo do ativo. Na metodologia FMEA estes eventos são os denominados modos de falha.

Santos *et al.* (2014a) utilizam a ferramenta FMEA para decompor um grupo gerador diesel nos seus diversos modos de falha e avaliar o risco de falha de cada um. No presente trabalho a mesma metodologia será aplicada para conhecer os eventos que apresentam risco ao objetivo do sistema, ou seja, os modos de falha.

2.6. Distribuições de probabilidade – Distribuição de Weibull

Para a construção da metodologia RBM de forma objetiva o método quantitativo é sempre preferível. A quantificação do índice de ocorrência depende do conhecimento e análise do histórico de falhas. Conhecendo o passado, conseguimos prever o futuro através de uma função matemática que caracterize a distribuição da probabilidade de falhas do equipamento em função do tempo. Para a modelação da probabilidade de falha de equipamentos reparáveis com degradação, a função de Weibull é a mais utilizada (Assis, 2010).

De acordo com Abernethy (2001), a principal vantagem da distribuição de Weibull é que não obriga a uma recolha de historial grande para definir os seus parâmetros e assim desenhar a tendência futura,

o que é extremamente útil quando se pretende modelar a probabilidade de ocorrência de acontecimentos de elevada severidade.

Assis (2010) apresenta como vantagem da distribuição de Weibull, na aplicação em engenharia, a sua versatilidade na descrição do tempo de vida até à falha de equipamentos sujeitos a fenómenos de degradação. Esta característica da distribuição de Weibull é resultado da sua flexibilidade disponibilizada pela variação dos seus três parâmetros.

A função densidade de probabilidade de falhas de acordo com a distribuição de Weibull é apresentada na equação 1. Esta distribuição apresenta três parâmetros.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left[\frac{t-t_0}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

Sendo a função acumulada de probabilidade de falhas a integração da função densidade de probabilidade de falhas em ordem ao tempo, a equação 2 apresenta a função acumulada de probabilidade de falhas de acordo com a distribuição de Weibull de três parâmetros: parâmetro de localização (t_0); parâmetro de forma (β) e parâmetro de escala ou vida característica (η).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

Sendo que t_0 representa o instante t em que começa a degradação do equipamento, considerando que a degradação se inicia assim que inicia a operação do equipamento, pode-se considerar $t_0 = 0$, simplificando a distribuição de Weibull e mantendo ainda assim uma aproximação bastante aceitável (Assis, 2010). A distribuição de Weibull depende assim somente de dois parâmetros, conforme representado na equação 3. A distribuição de probabilidade acumulada de falha representada pela distribuição de Weibull biparamétrica é a mais utilizada para análise do tempo de vida de equipamentos (Abernethy, 2001) e será esta a utilizar no presente trabalho.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

De seguida serão analisados os dois parâmetros da expressão de Weibull.

- Parâmetro beta, ou parâmetro de forma (Abernethy, 2001). Caracteriza o mecanismo de falha do equipamento no período de observação. Este parâmetro toma os seguintes valores e respetiva interpretação:
 - $\beta < 1$: equipamento em período de mortalidade infantil, curva de taxa de avarias descendente em ordem ao tempo;

- $\beta=1$: equipamento em período de vida útil, ocorrem falhas aleatórias, curva de taxa de avarias é constante;
- $\beta>1$: equipamento em fase de desgaste, a curva da taxa de avarias apresenta tendência crescente em função do tempo.
- Parâmetro eta, ou parâmetro de escala (Abernethy, 2001). Quando o instante t é igual ao parâmetro eta (vida característica) obtemos o valor de probabilidade de falha igual a 63,2%. Este parâmetro dá uma indicação do instante em que o equipamento alcança a probabilidade de falhar de 63,2%. Quanto maior o valor de eta, maior será a fiabilidade do sistema. Este parâmetro é igual ao valor do tempo médio para a falha (*mean time to failure* ou *MTTF*) quando beta é igual a 1. Esta simplificação facilita muito a análise, tendo em conta que um equipamento passará grande parte do seu tempo de vida na fase de vida útil.
 - Este parâmetro caracteriza as condições reais de utilização, sendo que é influenciado pelas condições de utilização do equipamento.

O problema tipo na fiabilidade é a compreensão dos dados recolhidos ao longo do tempo. No presente trabalho analisou-se o histórico de falhas dos equipamentos em análise para se conhecer a sua distribuição de probabilidade de falhas. Para a utilização da distribuição de Weibull, torna-se necessário conhecer os parâmetros adequados a cada modo de falha para modelar a criação das falhas no modelo construído.

2.6.1. Determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull

De acordo com Abernethy (2001) para amostras pequenas o melhor método de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull é o ajustamento da curva de regressão *median rank* (método Bernard), utilizando o tempo entre falhas como variável dependente. Assis (2010) utiliza o método de Bernard para demonstrar o cálculo dos parâmetros de Weibull para uma amostra de falhas de um equipamento. Existem vários *softwares* que utilizam estes algoritmos de forma automática para determinar os parâmetros de Weibull. No âmbito deste trabalho, por serem poucos dados a analisar, será utilizado o método gráfico, que permite determinar os parâmetros de Weibull através do “papel de Weibull”.

O desenvolvimento do método gráfico para determinar os parâmetros da distribuição de Weibull assenta nos seguintes passos (Sobral, 2014):

- 1- Listar o registo de falhas por ordem cronológica;
- 2- Calcular o tempo até à falha (TTF) para cada registo de falha ocorrida;
- 3- Colocar os TTF por ordem crescente do mais antigo para o mais recente;

- 4- Calcular os *median ranks*. O cálculo do valor de *median rank* é efetuado através da equação 4 (aproximação de Bernard);

$$MR = \frac{i-0,3}{N+0,4} \quad (4)$$

MR: *Median rank*

i: posição relativa da falha ou acontecimento

N: Número de falhas ou acontecimentos

- 5- Desenhar no papel de Weibull os *median ranks* e os TTF. Sendo que o valor de TTF é marcado na escala logarítmica das abcissas e os *median ranks* na escala das ordenadas de 0 a 100%;
- 6- Traçar uma reta o mais próxima possível dos pontos marcados;
- 7- Deslocar a reta traçada até ao valor de 0 das abcissas, mantendo o seu declive. O valor de beta será lido na escala própria do papel de Weibull;
- 8- O valor de eta será o valor lido na escala das abcissas para o qual a reta traçada inicialmente cruza o valor de ordenada igual a 63,2% ($F(t)=0,632$).

A aplicação desta metodologia será desenvolvida no capítulo 4 – Caso de Estudo, sendo demonstrado o seu desenvolvimento no Anexo A.

Capítulo 3 – Modelação, Otimização e Simulação Dinâmica

Quando a gestão de uma organização necessita tomar decisões que podem ter um impacto considerável nos objetivos da organização, a sustentação da decisão com o conhecimento prévio das possibilidades de resultados com as variáveis tomadas, é crucial. Um bom apoio à decisão passa por apresentar soluções com os resultados expectáveis. Uma decisão ideal é aquela que otimiza os recursos disponíveis para alcançar o objetivo proposto.

A otimização de processos, agora aplicada à engenharia, investiga métodos de modelação dos processos reais e propõe-se encontrar soluções que otimizem os resultados. Esta investigação apoia a gestão de topo a decidir de forma a obter os melhores resultados.

Porém, muitas das vezes os processos ou sistemas são tão complexos que as metodologias de otimização existentes não são capazes de modelar o sistema e encontrar a decisão ótima. Nestes casos, a simulação desempenha um importante papel. A simulação de processos e sistemas permite experimentar várias decisões possíveis para visualizar os resultados expectáveis. Esta ferramenta, aliada aos recursos computacionais atualmente existentes, é uma solução bastante viável para apoiar as decisões da gestão de topo. Esta será a ferramenta utilizada no desenvolvimento do presente trabalho, sendo apresentados nos próximos parágrafos alguns detalhes e características.

3.1. Modelação

Várias fontes, autores e o conhecimento geral, são consensuais na definição de modelo, ou seja, algo relacionado com a imitação. As definições na literatura sobre o que é um modelo afirmam que “um modelo não é o mundo real, mas uma construção humana para ajudar a entender os sistemas do mundo real” (Carleton College, 2015), ou ainda, “modelo é a representação de um sistema que permite investigar as propriedades do sistema e em alguns casos, prever futuros resultados desse sistema” (Investor Words, 2015). Ou seja, um modelo representa a realidade de uma forma simplificada e aproximada para que seja possível entender essa realidade.

A modelação será então a construção do modelo que representa a realidade e que servirá para estudar e investigar o seu comportamento. No contexto deste trabalho, o modelo simulará o caso de estudo

e servirá para investigar quais as variáveis de decisão a tomar para obter os melhores resultados. Para tal, o modelo permitirá simular os resultados que serão obtidos para cada decisão tomada.

3.2. Otimização

A otimização de problemas é uma matéria vastamente investigada e documentada. Hillier e Lieberman (2001) apresentam uma metodologia para a otimização de problemas através de métodos matemáticos. Os autores apresentam as seguintes fases para a resolução de problemas de otimização:

1. Definir o problema e efetuar o levantamento de dados;
2. Formular um modelo matemático que represente o problema;
3. Desenvolver um procedimento computacional que encontre as soluções ótimas para o problema modelado;
4. Testar o modelo e afiná-lo se necessário;
5. Preparar o modelo para aplicação;
6. Implementar.

Depois da fase da definição do problema, a formulação matemática será o “motor” da resolução do problema. De acordo com os autores, existem os seguintes fatores a considerar na fase da formulação matemática:

1. Função objetivo

Esta função representa o objetivo do modelo matemático construído. Deverá ser a maximização ou minimização de uma expressão construída pelas variáveis de decisão e pelos parâmetros do modelo.

2. Variáveis de decisão

As variáveis de decisão são as decisões que podem ser tomadas para alcançar o objetivo pretendido. Idealmente o modelo dará ao utilizador o valor de variáveis necessárias para alcançar o objetivo proposto.

3. Restrições

As restrições representam os limites do modelo, tornando-o mais realista. Normalmente estas restrições expressam o limite de recursos existentes para cumprirmos o objetivo.

4. Parâmetros

As constantes que formam a função objetivo e as restrições são os parâmetros do modelo.

A programação linear foi um dos mais importantes avanços científicos nos meados do século XX (Hillier e Lieberman, 2001). Esta permite resolver problemas de otimização que sejam modelados apenas por funções lineares. A grande vantagem destes problemas é poder ser utilizado um único

método transversal a vários problemas tipo, desde que lineares. O método *simplex* é um dos métodos para resolver problemas de programação linear.

Contudo, existem ocasiões em que os problemas não podem ser modelados por modelos lineares. Muitos economistas descobriram que a regra era precisamente os problemas não serem lineares (Hillier e Lieberman, 2001). A grande dificuldade da programação não linear é que não existe um método, como o *simplex*, que resolva todos os problemas existentes. Pelo contrário, deverá ser encontrado um método específico para cada problema.

3.3. Simulação

Quando a teoria de otimização linear não consegue responder ao problema proposto, por não ser linear ou porque é um processo estocástico onde não se consegue formular uma função objetivo, existe como alternativa a simulação dos resultados alterando as variáveis de decisão e assim, observar o comportamento do sistema. O processo de simulação consiste em utilizar recursos computacionais para simular, ou seja, imitar a realidade de operação de um sistema ou processo complexo.

A simulação é uma ferramenta largamente utilizada para analisar processos estocásticos. Estas simulações fazem correr o modelo e criam acontecimentos aleatórios que simulam o funcionamento do sistema modelado. Os recursos informáticos permitem simular um período de tempo de largos anos em poucos segundos. Esta possibilidade permite perceber como se comporta o sistema e decidir sobre a melhor opção.

A simulação desempenha um importante papel na otimização de sistemas e processos. Permite desenhar um sistema complexo peça a peça ou um processo complexo, e simular no tempo resultados estocásticos. Para modelar um sistema para a simulação, Hillier e Lieberman (2001) apresentam os seguintes passos:

1. Identificar o estado atual do sistema;
2. Identificar os estados possíveis do sistema;
3. Identificar os eventos possíveis de ocorrer que podem alterar o estado atual do sistema;
4. Atribuir um contador de tempo no processo de simulação;
5. Criar um método que gere eventos aleatoriamente ao longo do tempo;
6. Construir uma expressão que identifique as mudanças de estado geradas pelo acontecimento de eventos.

Para conduzir um estudo de simulação, depois de modelado o sistema, os mesmos autores apresentam o seguinte procedimento de construção:

1. Formular o problema;

Neste ponto, a equipa de investigação deve questionar a equipa de gestão sobre qual o problema, quais os objetivos que pretendem para o projeto de simulação, quais as alternativas a serem simuladas, quais os resultados esperados e como se pode avaliar o desempenho do sistema com as diferentes alternativas simuladas.

2. Recolher dados e formular o modelo para a simulação;

Os dados a recolher serão importantes para modelar o sistema estocástico e perceber como ele se comportou no passado para o fazer comportar de forma semelhante no futuro, se isso assim fizer sentido.

O processo de construção do modelo já foi anteriormente apresentado. Geralmente este modelo é representado através de um diagrama de fluxo, onde se ligam os vários processos a simular.

3. Verificar a adequabilidade do modelo;

Antes de passar para a programação do modelo, este deve ser alvo de uma verificação para perceber se faz sentido e se representa realmente o sistema a simular.

4. Selecionar o *software* de simulação e construir o programa computacional de simulação;

Existem vários tipos de *software* de simulação, desde uma simples folha de cálculo Excel para modelos mais simples, como linguagens de programação apropriadas para simular processos estocásticos, assim como *softwares* que utilizam estas linguagens para simular modelos de uma forma simplificada para o utilizador. Existe *software* mais flexível e outros mais específicos ao tipo de modelo a construir. Contudo, o importante é selecionar sempre um *software* que consiga representar o modelo que se pretende.

5. Testar a validade do modelo;

Depois de obtidos os primeiros resultados é necessário perceber se o modelo está a criar resultados viáveis de serem analisados.

A dificuldade deste passo é que a maior parte das vezes se está a simular um processo que nunca ocorreu. Se existir um caso real, pode-se comparar os dados. Porém, na maioria dos casos não existe uma situação real para comparar dados. Resta a estimativa analítica de resultados. Ainda que grosseira, pode servir de validação. Pode ser construído um protótipo para recolher dados de ensaio e comparar com os resultados da simulação do modelo, ou ainda, utilizando a experiência do pessoal envolvido no processo, uma análise crítica de alguém com experiência, por forma a verificar se estamos a alcançar resultados credíveis.

6. Planear as simulações a fazer

Nesta fase devem estar listadas as decisões a simular, os parâmetros de simulação, o tempo de simulação e o número de ensaios.

7. Correr a simulação e analisar os resultados

O output da simulação serão os diferentes valores dos indicadores de desempenho selecionados. Estes indicadores dirão o comportamento do sistema para as diferentes decisões simuladas.

8. Apresentação de recomendações à gestão

Depois da análise dos resultados, deve resultar uma recomendação à gestão que contratou a simulação. A decisão deverá ser aquela que obteve os melhores resultados no conjunto de simulações feitas.

3.4. Seleção do programa de simulação

Hillier e Lieberman (2001) categorizam os *softwares* de simulação em quatro classes distintas:

1. A primeira classe, mais simples e fácil de utilizar refere-se aos diferentes tipos de *software* com folhas de cálculo, como o Excel. Este *software* consegue criar números aleatórios e assim permite simular modelos simples;
2. A segunda classe de *software*, inclui programas que utilizam linguagem de programação de utilização geral, como C, FROTRAN, PASCAL ou BASIC. Estas linguagens de programação têm a vantagem de possuir grande flexibilidade, permitindo simular qualquer modelo. A desvantagem é de que carece de demasiado tempo para modelar e simular o problema pretendido;
3. A terceira classe de *software* de simulação utiliza linguagem de programação específica para simulação. Estes programas reduzem o tempo necessário à programação, porém, perdem alguma flexibilidade de modelação e ainda é necessário alguma experiência e conhecimento em programação através das linguagens utilizadas;
4. A quarta classe de *software* de simulação envolve as aplicações orientadas para simulação. São aplicações que funcionam com a linguagem de simulação da terceira classe de *software* apresentada, porém utiliza um ambiente gráfico para facilitar a modelação para o utilizador. Estes programas muitas vezes incorporam a capacidade de apresentação de resultados de forma gráfica, que potencia bastante a comunicação de resultados da simulação.

A desvantagem destes *softwares* é que perdem alguma flexibilidade, visto que são construídos para áreas específicas que regularmente utilizam *software* de simulação.

É nesta classe de *software* que se incorpora a aplicação utilizada para desenvolver este trabalho, designado por Arena.

Existem no mercado vários *softwares* de simulação. Paulo Marques (2007) na sua tese de mestrado apresenta alguns dos *softwares* de simulação existentes. No conjunto de *softwares* criados pela

Reliasoft, empresa especializada em problemas de fiabilidade, existe o *Reno*. O *Reno* é um *software* que permite efetuar simulações através do desenho de um fluxograma de processos. Permite criar fluxogramas de modelos para análise de fiabilidade de sistemas, risco, segurança e ainda apoio no planeamento de manutenção. Contudo, à semelhança de Paulo Marques (2007), também neste trabalho foi selecionado o pacote de *software* Arena da *Rockwell Automation*. O Arena além de apresentar boas características, tem a vantagem de ser disponibilizado gratuitamente para estudantes, fator que em muito contribuiu para a seleção deste *software*.

O Arena é um *software* de simulação de eventos discretos. Foi desenhado para simular modelos de negócios e otimizar processos industriais, porém, apresenta uma grande flexibilidade e possui uma ferramenta de modelação de processos através de fluxogramas. No presente pretende-se utilizar este *software* de simulação na área da manutenção. Este campo de utilização do Arena não é usual, porém, a sua flexibilidade permitirá adaptar a sua utilização ao problema abordado.

O processo de modelação do Arena começa pela construção de um fluxograma. Este fluxograma representa a passagem de uma entidade por um ou vários processos. Os processos representam o modelo a construir e a entidade o evento a analisar (Rockwell Automation, 2012). Uma das premissas base da modelação em Arena é que tudo começa com a criação de uma entidade que irá percorrer o fluxograma de processos e terá que ser “eliminada” saindo do processo.

O passo seguinte à construção do fluxograma, será caracterizá-lo no *software* com os dados recolhidos. Neste passo são atribuídas características aos módulos que compõem o processo (Rockwell Automation, 2012). Os módulos básicos de modelação em Arena são:

- **Criação:** cria uma entidade com um intervalo de tempo que pode ser constante, aleatório ou seguir uma distribuição estatística.
- **Processo:** são os módulos que processam as entidades, consome uma quantidade de tempo (que pode ser constante ou variável (aleatório ou com distribuição estatística)), segura a entidade provocando um atraso e requer um recurso para desenvolver a atividade. Uma entidade ao chegar ao processo, quando chegar a sua vez, vai agarrar o recurso (*seize*) demorar o tempo do processo (*delay*) e soltar o recurso para outro trabalho (*release*).
- **Decisão:** são módulos de comparação binária (*true/false*).
- **Dispor:** neste módulo a entidade é retirada do processo.

Com estes módulos pode-se criar entidades, processá-las, decidir o caminho da entidade no meio das várias possibilidades de processamento, definir parâmetros de simulação e no final remover as entidades do fluxograma, apresentados os resultados. Na figura 3, é apresentado um exemplo simples

da simulação de um modelo de um processo, onde existe um módulo de criação de entidades, um processo, uma porta lógica e duas saídas possíveis.

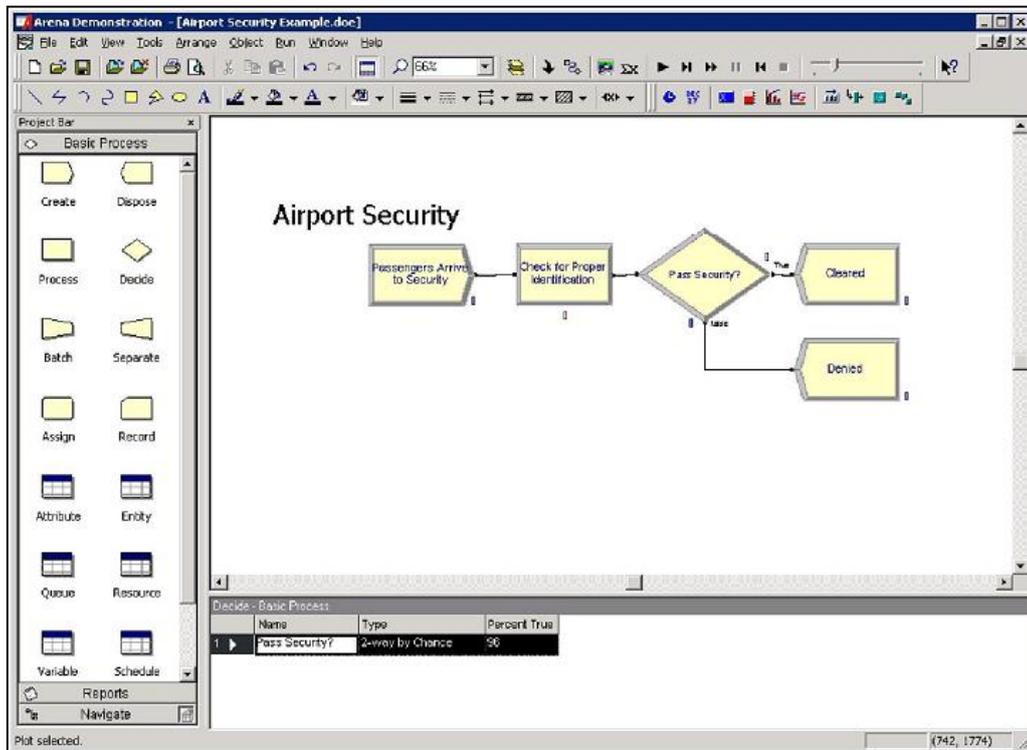


Figura 3 – Exemplo de modelo simulação Arena (Rockwell Automation, 2012)

No capítulo do caso de estudo será demonstrada a utilização do Arena para modelar e simular o problema apresentado. Os módulos aqui apresentados serão utilizados e parametrizados com os dados existentes. No final serão analisadas os resultados do modelo e concluído se este método é útil para resolver o problema apresentado.

Capítulo 4 – Caso de Estudo

4.1. Descrição do Caso de Estudo

No presente capítulo será utilizado um caso de estudo para alcançar o objetivo do trabalho. Será demonstrada a construção de um modelo que permitirá simular decisões de manutenção no caso de estudo, de forma a apoiar a decisão e conseguir a otimização da sua manutenção. Com o modelo construído, será possível escolher técnicas de controlo de condição que permitam reduzir o risco de falha. A seleção das técnicas irá depender da sua eficácia e do seu custo de implementação.

A resolução do problema do caso de estudo passará por duas fases:

1. Abordagem da manutenção com base no risco.

Nesta fase são identificados os modos de falha e quantificados os riscos de falha inerentes.

2. Simulação de decisões de manutenção.

Depois de caracterizado o risco de cada modo de falha serão selecionadas técnicas de manutenção. A simulação do modelo permitirá conhecer o impacto no risco das decisões tomadas.

Como caso de estudo, foi selecionado um sistema real que permitisse recolher o registo de falhas dos diferentes componentes que o constituíssem. O sistema escolhido servirá como base de trabalho para construir o modelo que será simulado. Porém, o modelo depois de construído e validado servirá da mesma forma para qualquer sistema composto por vários componentes, desde que seja conhecido o seu histórico de falhas.

O sistema real selecionado foi a plataforma de um navio de guerra da Marinha Portuguesa, o NRP “Alvares Cabral”. Este navio pertence à classe de fragatas Vasco da Gama (figura 4). Estes navios foram construídos na Alemanha, na década de 1990, e foram aumentados ao efetivo da Marinha Portuguesa em 1991. Desde que entraram ao serviço estes navios têm tido um longo historial de missões bem-sucedidas (Marinha, 2015) onde se incluem missões nacionais e internacionais integrados em forças estrangeiras.



Figura 4 - Fragata da classe "Vasco da Gama"

O histórico de avarias do NRP Alvares Cabral entre o período de 01-01-2010 a 01-06-2015, servirá de base de dados para os cálculos do modelo a construir. Neste período foram recolhidos os relatos de falhas dos sistemas do navio. Do histórico, foram recolhidos os registos de falhas que implicassem com o cumprimento dos objetivos estabelecidos para o navio e cujo tempo de reparação fosse igual ou superior a 4 horas.

Conhecido o histórico de avarias de todos os sistemas do navio, foram selecionados equipamentos que provoquem um impacto relevante no cumprimento dos objetivos do navio caso falhem e ainda que permitissem obter resultados necessários para comprovar a validade do modelo criado. Aos sistemas selecionados será aplicada a metodologia de Manutenção com Base no Risco (RBM), apoiada pela metodologia FMEA para conhecer os seus modos de falha e ser possível quantificar o risco de cada um. Este risco será avaliado de acordo com o critério de avaliação estabelecido. Depois de serem conhecidos os riscos correspondentes aos diferentes modos de falha, será simulado o modelo construído para analisar as várias opções e selecionar a melhor decisão de controlo de condição. A sequência do trabalho elaborado para o caso de estudo está demonstrada na figura 5.



Figura 5 - Sequência de trabalho no caso de estudo

Os sistemas selecionados para o presente trabalho apresentam-se listados a seguir acompanhados de uma breve explicação. O objetivo primário da plataforma do navio é flutuar, ter propulsão à velocidade requerida e conseguir manobrar para ter a direção desejada. A plataforma cumprindo os seus objetivos disponibilizará condições para outros grandes grupos de sistemas cumprirem os seus como as armas e os radares, e assim permitir o cumprimento da missão atribuída ao navio. Na lista de equipamentos em baixo é avaliado o contributo de cada sistema da plataforma para o objetivo do navio:

1. **Grupo motores propulsores.** O navio possui dois motores diesel que juntos disponibilizam cerca de 50% da capacidade de propulsão necessária. Cada motor disponibiliza então 25% da capacidade de propulsão ao navio.
2. **Grupo de turbinas a gás.** O navio possui duas turbinas a gás, juntas disponibilizam potência para o navio atingir a velocidade máxima requerida. A falha de uma das turbinas implica o não cumprimento do requisito da velocidade.
3. **Grupo de geradores elétricos.** O navio possui quatro motores geradores. Cada um disponibiliza 25% da capacidade de produção elétrica, que irá alimentar outros sistemas vitais do navio. O navio pode operar com 50% da sua capacidade de produção elétrica mas há sistemas não vitais que serão afetados.
4. **Grupo de ar condicionado.** O navio possui dois grupos de ar condicionado que podem operar sozinhos ou em conjunto. Este sistema não é vital para o objetivo do navio, mas a falha de qualquer um dos grupos poderá afetar sistemas não vitais.
5. **Grupo de compressores de ar.** O navio possui dois grupos de compressores de ar, que produzem ar de alta pressão utilizado para o arranque de motores para propulsão ou produção de energia e ainda das turbinas. A falha deste sistema não afeta imediatamente o objetivo do navio, mas a prazo condicionará a capacidade de arranque de motores.

4.2. Aplicação do método RBM

Neste subcapítulo é aplicada a metodologia RBM ao caso de estudo selecionado. Conforme apresentado no capítulo 2.3, das metodologias apresentadas foi selecionada a metodologia de Khan e Haddara (2003) para aplicação no caso de estudo escolhido. A metodologia é dividida em três fases:

1. **Cálculo do risco.** Para esta etapa será utilizada a ferramenta FMEA.
2. **Avaliação do risco.** Para a definição do critério de aceitação, serão utilizados os patamares definidos por Santos *et al.* (2014b).
3. **Planeamento da manutenção.** O passo de planeamento da manutenção será apoiado pelos resultados obtidos na simulação do modelo construído. O decisor terá oportunidade de simular várias hipóteses de técnicas de manutenção condicionada e avaliar qual a decisão mais eficiente, ou seja, aquela que reduz mais o risco ao menor custo.

4.2.1. Cálculo do risco

A metodologia para o cálculo do risco neste trabalho é apoiada pela metodologia FMEA descrita no subcapítulo 2.4. A metodologia para cálculo do risco adotada pressupõe os seguintes passos:

1. **Decomposição dos eventos** que põem em causa o objetivo definido. Neste caso, os eventos serão os modos de falha do sistema selecionado, identificados pela abordagem funcional de

decomposição. A abordagem funcional para a decomposição dos modos de falha, passa pelos seguintes passos:

- 1- Listar todos os componentes do sistema até ao nível desejado.

Neste trabalho foi tido em conta que o nível escolhido seria até onde os dados do histórico permitissem fazer uma análise fidedigna;

- 2- Definir as funções de cada componente;
- 3- Identificar a falha funcional em cada função;
- 4- Listar os modos de falha para cada falha funcional identificada.

No caso de estudo, foram selecionados alguns sistemas de interesse para analisar no modelo construído. Na tabela 1, estão listados, os modos de falha em análise.

A decomposição dos sistemas em equipamentos e a decomposição destes em componentes seria a forma ideal de listar os modos de falha. Esta decomposição ao mais baixo nível permitiria aplicar técnicas de manutenção condicionada aos modos de falha que estas são capazes de detetar. A decomposição feita ficou limitada pela inexistência de dados de histórico mais detalhados, que permitissem nas próximas fases do modelo caracterizar o comportamento dos modos de falha ao mais baixo nível. Foi por isso considerado que a decomposição ficaria condicionada ao nível da existência dos dados do histórico.

Tabela 1- Modos de falha do caso de estudo

Sistema / Subsistema	Função	Falha funcional	Modo de falha
<i>Sistemas de Propulsão</i>			
1 Motor principal nr 1	Produz 7% da potência do navio	Não produz potência	Motor inoperacional
2 Motor principal nr 2	Produz 7% da potência do navio	Não produz potência	Motor inoperacional
3 Turbina nr 1	Produz 43% da potência do navio	Não produz potência	Turbina inoperacional
4 Turbina nr 2	Produz 43% da potência do navio	Não produz potência	Turibna inoperacional
<i>Sistemas de produção e distribuição de energia</i>			
5 Gerador nr 1	Produz 25% da energia elétrica do navio	Não produz energia elétrica	Gerador inoperacional
6 Gerador nr 2	Produz 25% da energia elétrica do navio	Não produz energia elétrica	Gerador inoperacional
7 Gerador nr 3	Produz 25% da energia elétrica do navio	Não produz energia elétrica	Gerador inoperacional
8 Gerador nr 4	Produz 25% da energia elétrica do navio	Não produz energia elétrica	Gerador inoperacional
<i>Sistemas auxiliares</i>			
9 Grupo ar condicionado nr 1	Arrefecer água de refrigeração ambiente	Não refrigera água	Grupo inoperacional
10 Grupo ar condicionado nr 2	Arrefecer água de refrigeração ambiente	Não refrigera água	Grupo inoperacional
11 Compressor ar nr 1	Comprimir ar alta pressão	Não comprime	Compressor inoperacional
12 Compressor ar nr 2	Comprimir ar alta pressão	Não comprime	Compressor inoperacional

2. Avaliação da severidade de cada modo de falha.

Vários autores dividem a severidade em vários fatores de consequência, como a afetação do desempenho, perdas económicas, danos na segurança e no ambiente (Khan, 2003). Wang *et al.* (2012) apresentam a severidade composta pelo contributo das consequências na segurança, no ambiente e em perdas económicas. A norma NP EN 13306:2007 define consequência como o “efeito de um evento, afetando os objetivos”. Como tal, para a

severidade ter vários fatores, todos eles devem estar vertidos no objetivo definido para o sistema. Neste trabalho, o objetivo dos sistemas selecionados é de garantir a um navio de guerra, a flutuabilidade, a propulsão (velocidade) e a capacidade de manobra. Como tal, a severidade que contribui para quantificar o cálculo do risco de falha, vai avaliar as consequências das falhas no objetivo geral do sistema.

À semelhança do artigo de Santos *et al.* (2014b), a avaliação da severidade no caso de estudo será feita de forma qualitativa e a matriz utilizada está representada na tabela 2. Esta matriz foi baseada na norma MIL STD 1629A (Department of Defense - USA, 1980) adaptada com a matriz utilizada por Wang *et al.* (2012).

Tabela 2- Matriz de avaliação do índice de severidade

Classificação		Descrição
<i>Catastrófico</i>	9 a 10	Muito importante para a operação do sistema. A falha provocará a paragem do sistema.
<i>Crítico</i>	7 a 8	Importante para a boa operação. A falha provocará degradação do desempenho do sistema e poderá provocar consequências adversas.
<i>Marginal</i>	5 a 6	Necessário para a boa operação. A falha poderá afetar o desempenho do sistema e poderá provocar consequente falha do sistema.
	3 a 4	Opcional para o bom desempenho. A falha não afeta o desempenho do sistema imediatamente. Mas a falha prolongada poderá provocar falha do sistema.
<i>Menor</i>	1 a 2	Opcional para a operação. A falha não deverá afetar o desempenho do sistema.

Esta metodologia foi aplicada aos modos de falha da tabela 1. Para cada modo de falha é avaliado de que forma este afeta o contributo do equipamento para o objetivo do navio. Na tabela 3 é demonstrado os valores de índice de severidade atribuídos aos modos de falha e no campo observações foi colocado um texto justificativo.

Tabela 3 - Atribuição do índice de severidade

Sistema / Subsistema		Modo de falha	S	Observações
<i>Sistemas de Propulsão</i>				
1	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	8	A paragem de um motor degrada a operação do navio porque retira capacidade de propulsão. Ainda assim, falhando um motor existe a redundância do outro motor ou das duas turbinas para propulsionar o navio.
2	Motor principal nr 2	Motor inoperacional	8	
3	Turbina nr 1	Turbina inoperacional	9	A falha de uma turbina é o suficiente para que o navio não cumpra com os requisitos de velocidade máxima. Pelo que se considera este equipamento muito importante para a operação do navio.
4	Turbina nr 2	Turibna inoperacional	9	
<i>Sistemas de produção e distribuição de energia</i>				
5	Gerador nr 1	Gerador inoperacional	5	A falha de um gerador reduz a capacidade de produção de energia do navio. Ainda assim, é possível manter os sistemas vitais do navio e cumprir com os objetivos. A acumulação de falhas de geradores poderá afetar o navio e não permitir que cumpra os seus objetivos, daí a atribuição da categoria 5 de severidade.
6	Gerador nr 2	Gerador inoperacional	5	
7	Gerador nr 3	Gerador inoperacional	5	
8	Gerador nr 4	Gerador inoperacional	5	
<i>Sistemas auxiliares</i>				
9	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	4	O grupo de ar condicionado é opcional para o bom desempenho do navio, não limitando as funções vitais deste. Porém, se for for uma falha prolongada poderá afetar sistemas vitais e afetar o desempenho do navio.
10	Grupo ar condicionado nr 2	Grupo inoperacional	4	
11	Compressor ar nr 1	Compressor inoperacional	5	A falha de um compressor não afeta diretamente as funções vitais do navio, porém este equipamento é necessário para o bom funcionamento do navio.
12	Compressor ar nr 2	Compressor inoperacional	5	

3. Avaliação do índice de ocorrência.

Conforme descrito na aplicação da metodologia FMEA no caso de estudo selecionado, a decomposição dos sistemas ficou pelo equipamento completo para que seja possível recolher dados fiáveis do histórico de falhas. Esta decisão permitirá fazer uma avaliação do índice de ocorrência de forma quantitativa.

Khan e Haddara (2003) utilizam o método de atribuição do índice de ocorrência de forma quantitativa no seu trabalho. Os autores consideram que o índice de ocorrência no cálculo do risco é determinado pela probabilidade de ocorrência do modo de falha no período de um ano. No presente trabalho foi adotada esta metodologia para quantificar o índice de ocorrência.

Para a quantificação do valor da probabilidade de falha num ano, será necessário conhecer a função distribuição de probabilidade de falha do modo de falha com base no histórico. Como se estão a avaliar equipamentos reparáveis, sujeitos a degradação, será adotada a função distribuição de Weibull de dois parâmetros.

Com o histórico de cada modo de falha, é aplicado o método gráfico para determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull. Conhecendo os parâmetros da distribuição de Weibull, é possível determinar a probabilidade de falha para $t=365$ dias, que será o valor atribuído ao indicador de ocorrência.

Para conhecer os parâmetros da distribuição de Weibull da função densidade de probabilidade para cada modo de falha, que será usada para calcular a probabilidade acumulada de falha em 365 dias, foi utilizado o método gráfico apresentado no ponto 2.6.1. do capítulo 2. No Anexo A, está demonstrada a metodologia de determinação dos parâmetros de Weibull para cada modo de falha com os gráficos obtidos.

Conhecendo os parâmetros η e β da distribuição de Weibull, o Microsoft Excel permite determinar a probabilidade acumulada de falha ($F(t)$) para determinado valor de t , com a função “=Weibull(t ;beta; η ;Verdadeiro)”, fazendo a seleção “verdadeiro” a fórmula devolve a probabilidade de falha acumulada ($F(t)$), com a seleção “falso” devolve a densidade de probabilidade ($f(t)$). No caso de estudo do presente trabalho, o valor assumido para o indicador de ocorrência será o resultado de $F(t)$ para $t=365$.

4. Cálculo do risco de cada modo de falha. Será o resultado do produto do valor da ocorrência com o índice de severidade. Na tabela 4 são apresentados os valores de severidade atribuídos (S), os valores de ocorrência (O) (calculados mediante os parâmetros da distribuição de Weibull obtidos do método gráfico), e o resultado do risco, que é determinado pelo produto

entre os valores atribuídos a S e O. O valor do risco terá um mínimo assumido de 0,1 e máximo de 10.

4.2.2. Avaliação do risco

De acordo com o estipulado na norma ISO 31000 (2009), serão considerados três patamares de risco para os vários modos de falha:

- Risco intolerável;
- Risco moderado;
- Risco aceitável;

Para caracterizar os diferentes patamares de risco serão utilizados os parâmetros utilizados por Santos *et al.* (2014b). Assim temos que:

- Risco intolerável: Para modos de falha com índice de risco superior a 70% do risco máximo (≥ 7);
- Risco moderado: Entre 70 e 40%, ($4 \leq \text{risco} < 7$);
- Risco aceitável: Inferior a 40%, risco (< 4).

4.2.3. Resultados

Adotando a metodologia para a determinação dos valores de severidade e ocorrência atrás esclarecida foi calculado o índice de risco para cada modo de falha conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4- Cálculo do risco do caso de estudo

Sistema / Subsistema	Modo de falha	Beta	Eta	S	O	Risco
<i>Sistemas de Propulsão</i>						
1	Motor principal nr 1	1,3	420	8	56,53%	4,52
2	Motor principal nr 2	1,3	550	8	44,39%	3,55
3	Turbina nr 1	-	-	9	10,00%	0,90
4	Turbina nr 2	0,55	400	9	61,36%	5,52
<i>Sistemas de produção e distribuição de energia</i>						
5	Gerador nr 1	0,6	300	5	67,53%	3,38
6	Gerador nr 2	1,5	250	5	82,87%	4,14
7	Gerador nr 3	0,2	150	5	69,72%	3,49
8	Gerador nr 4	0,7	500	5	55,17%	2,76
<i>Sistemas auxiliares</i>						
9	Grupo ar condicionado nr 1	1,6	210	4	91,12%	3,64
10	Grupo ar condicionado nr 2	0,77	600	4	49,44%	1,98
11	Compressor ar nr 1	-	-	5	10,00%	0,50
12	Compressor ar nr 2	-	-	5	10,00%	0,50
						Max= 10

Seguem-se algumas considerações dos resultados obtidos e do método de cálculo:

- Os modos de falha 3, 11 e 12 nunca ocorreram no período de observação do histórico. Teoricamente, o índice de ocorrência seria igual a zero e consecutivamente teriam risco igual a zero. Conforme explicado no capítulo 1 (Introdução), não existem eventos com risco nulo, assim, foi considerado o valor mínimo de 10% para o índice de ocorrência.

- Dos sistemas selecionados, encontram-se 3 em situação de tolerável (modo de falha 1, 4 e 6). Nestes modos de falha o objetivo será reduzir o risco abaixo de 4.

4.3. Construção do Modelo

Depois de avaliar o risco dos modos de falha do sistema, será necessário reduzir o risco daqueles que estejam fora dos parâmetros definidos como aceitáveis. Além destes, a gestão de topo pode querer reduzir o risco de falha global do sistema e assim pode ser trabalhado qualquer modo de falha.

Neste subcapítulo será construído um modelo que será usado para simular várias decisões, com o objetivo de perceber de que forma será possível reduzir o risco. Das decisões escolhidas, será possível perceber qual é a mais eficaz e a mais económica, fazendo a relação de custo e benefício.

Fazendo uma interpretação da metodologia de modelação em Arena apresentada no subcapítulo 3.4 ao problema proposto neste trabalho, a entidade a criar será uma falha potencial, o processo será o percurso que a falha faz entre inspeções até que se transforma, ou não, numa falha funcional e é removida do fluxograma com manutenções preventivas ou corretivas, caso a falha potencial passe a falha funcional. As decisões tomadas e introduzidas no modelo terão impacto no resultado da simulação, influenciando o percurso das falhas no fluxograma do modelo.

Para construir o fluxograma na modelação do caso de estudo, é analisado o percurso da entidade entre os diferentes processos do fluxograma, colocando as seguintes questões:

- Onde é que a falha entra no processo?
- O que acontece à falha em cada passo?
- Que recursos são necessários para completar o trabalho?

Para apoiar a construção do modelo no *software* de simulação dinâmica Arena, foram utilizadas folhas de cálculo construídas com o *software* de cálculo Excel para cálculos simples e compilação de parâmetros e resultados. O fluxograma apresentado na figura 6, representa graficamente o modelo construído. Para o fluxograma ser mais perceptível, foi tracejado a verde a fase de cálculos desenvolvida em folhas de cálculo Excel e a vermelho a fase de simulação dinâmica em Arena.

A simulação do modelo construído corre em 3 fases:

- **Fase 1-** Cálculos preparativos dos parâmetros de simulação.
Nesta fase são calculados os parâmetros a serem introduzidos no motor de simulação (*software* Arena). Esta fase corre em folhas de cálculo Excel.
- **Fase 2-** Simulação.

Nesta fase o motor de simulação do Arena, com os parâmetros introduzidos, irá correr o modelo o número de ensaios definidos durante o período de tempo definido.

- **Fase 3-** Análise de resultados.

Os resultados do motor de simulação Arena terão que ser tratados para análise. Estes cálculos são novamente efetuados numa folha Excel que compila os resultados obtidos.

O fluxograma representado na figura 6 inicia do topo para a base da figura e da esquerda para a direita. O fluxograma terá que ser corrido para cada modo de falha.

O processo inicia-se pela compilação do histórico de falhas e dos dados associados às técnicas de inspeção, como a detetabilidade e os custos unitários de implementação. Depois de reunida a informação do histórico de falhas são determinados os parâmetros da distribuição de Weibull através do método gráfico, conforme explicado no ponto 3.6.1.

Paralelamente, com os dados dos custos das técnicas de inspeção e a periodicidade aplicada a cada técnica é calculado o custo de implementação da decisão através de folhas de cálculo Excel. Com o valor da periodicidade, e também numa folha de cálculo Excel, é calculada a probabilidade de coincidência de uma técnica de inspeção numa possível falha.

Com os cálculos auxiliares feitos em Excel inicia-se a simulação em Arena. Os parâmetros da distribuição de Weibull são parâmetros que definem a taxa de criação das falhas potenciais no módulo de criação de falha. Quando uma falha potencial ocorre, passa por uma porta lógica “coincide“, se a falha coincidir com uma técnica de inspeção, esta passa pela porta lógica “deteta?”, agora esta porta avalia se a técnica consegue detetar a falha com que coincidiu (a porta “deteta” é afetada pela detetabilidade da técnica). Se a resposta for “sim”, a falha potencial não chegará a falha funcional e ocorre uma manutenção preventiva evitando uma falha. Caso a porta lógica “coincide” ou a porta lógica “deteta” responderem “não”, então a falha potencial passa a falha funcional. Um contador calcula o MTTF entre falhas, e este resultado demonstrará a eficácia da decisão tomada.

Com o resultado do MTTF no Arena, é possível calcular o novo índice de ocorrência O' . O novo índice de ocorrência multiplicado pelo índice de severidade inicial que não sofre alterações, resulta no cálculo do risco corrigido.

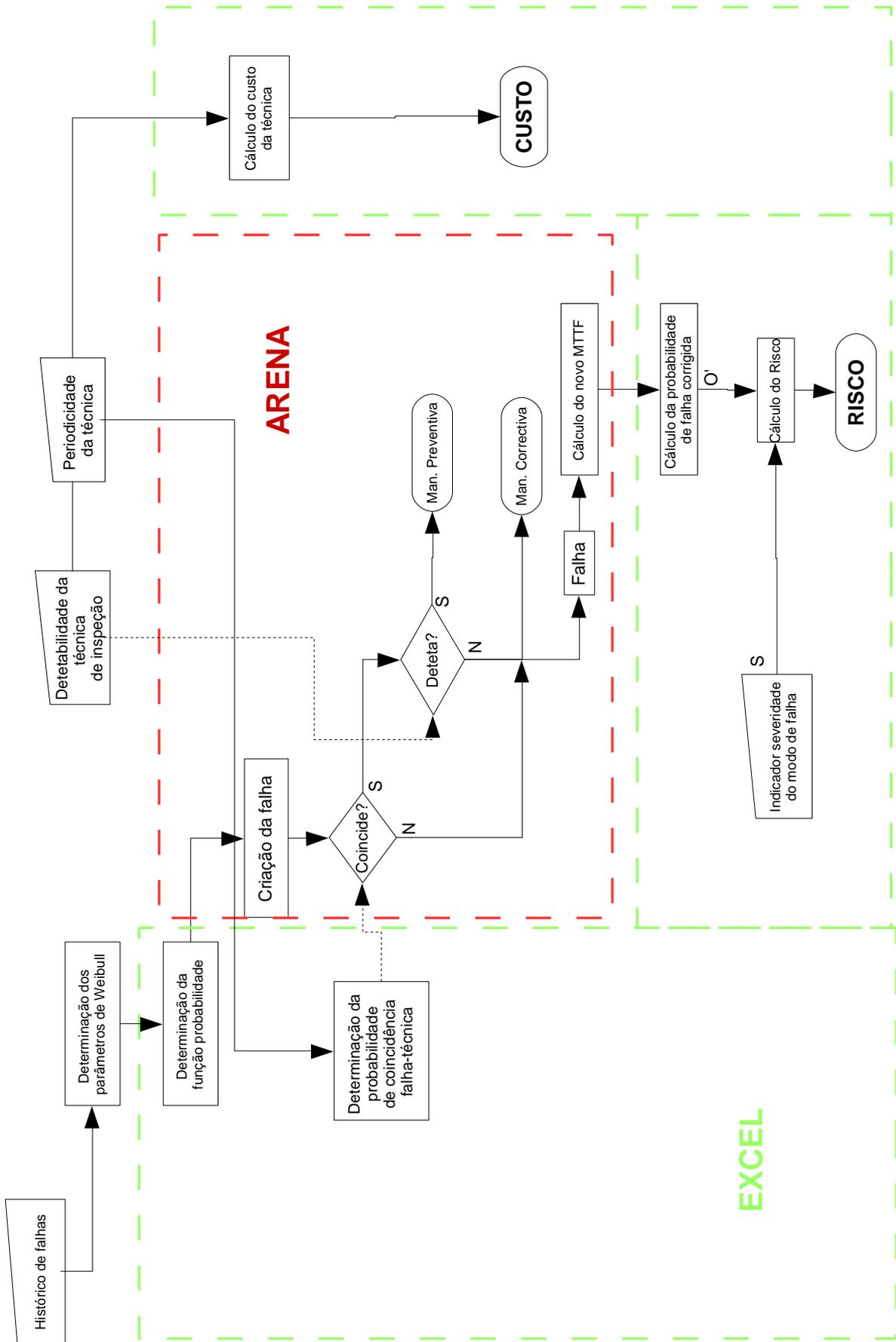


Figura 6 - Fluxograma do modelo construído para simulação dinâmica

4.4. Fase 1- Parâmetros de Simulação

Para correr a simulação do modelo, são necessários parâmetros que fazem com que este obtenha resultados o mais próximo da realidade esperada. Quanto mais exatos forem os parâmetros do modelo mais próximo estará da realidade.

Nos próximos pontos do trabalho serão apresentados os métodos de cálculo dos parâmetros necessários para correr a simulação do modelo para cada modo de falha.

4.4.1. Taxa de criação da falha

A fase de simulação, limitada com tracejado vermelho na figura 6, inicia-se com a criação de uma entidade que simulará o surgimento de uma falha potencial. No Arena a entidade falha será criada num módulo tipo *create* com designação “Cria falha”, demonstrado na figura 7. Este módulo permite criar falhas, com uma periodicidade constante, aleatória ou pode ainda seguir uma função de distribuição de probabilidades.

No modelo construído, o módulo “Cria falha”, cria falhas de acordo com uma distribuição de Weibull, com os parâmetros beta e eta calculados para cada modo de falha apresentado na tabela 1.

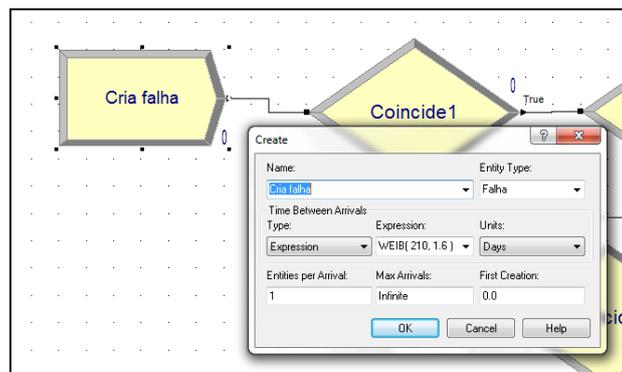


Figura 7 - Módulo "Criar falha"

4.4.2. Porta lógica “Coincide?”

Um dos fatores que o modelo tem que ter em conta na simulação é a periodicidade de aplicação da técnica de controlo de condição. É expectável que para a mesma técnica escolhida, quanto menor forem os intervalos de tempo entre aplicações, maior a probabilidade de deteção da falha.

Para que o modelo considerasse a periodicidade das técnicas, foi criada a porta lógica “Coincide?”.

Para que se perceba a estruturação da ideia da porta lógica “Coincide?”, é importante definir o conceito de curva de degradação P-F apresentado no capítulo 2.

A porta lógica “Coincide?” tem duas saídas, *true* ou *false*, escolhida com uma probabilidade de ocorrência que representa a probabilidade de uma técnica de detecção coincidir com a existência de uma falha. Na figura 8, apresenta-se uma das portas lógicas construídas no fluxograma em Arena, com a janela de introdução do parâmetro de decisão em porcentagem de ocorrência.

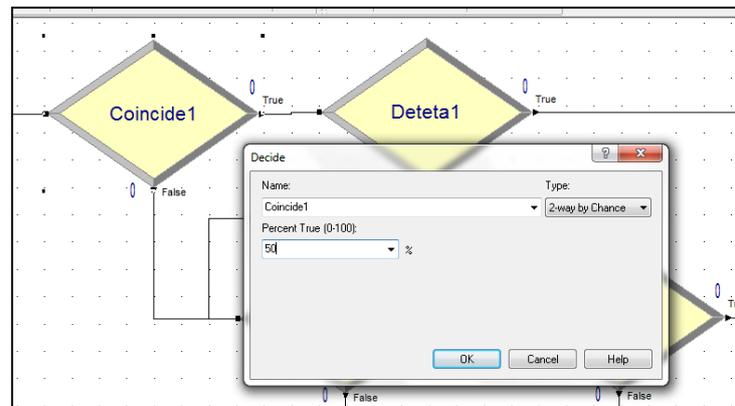


Figura 8 - Porta lógica "Coincide"

Esta probabilidade é calculada com apoio a uma folha de cálculo em Excel, apresentada no Anexo B. Para o cálculo desta probabilidade, entram como variáveis de entrada o período de degradação de falha e a periodicidade entre técnicas de manutenção.

A folha Excel construída cria aleatoriamente uma falha que ocorre num instante P e soma o período de degradação da falha, resultando no instante F. Este intervalo de tempo representa o período de degradação P-F. Paralelamente, a folha de cálculo definiu o acontecimento de inspeções com a periodicidade introduzida, esta inspeção é um acontecimento repetido periodicamente. O algoritmo na folha de cálculo vai analisar se o intervalo de tempo de degradação coincide com alguma inspeção. Se sim, há coincidência. Este ensaio é repetido o número de vezes suficiente para obter um valor estável de probabilidade de coincidência, que será a relação de falhas detetadas sobre o número de ensaios feitos.

O número de ensaios a realizar deve ser suficiente para obter um valor de probabilidade de coincidência estável. O gráfico representado na ilustração 9 mostra o resultado de probabilidade de coincidência (%) em relação ao número de ensaios feitos. Resulta que o valor tende a estabilizar a partir dos 400 ensaios. Foi então estabelecido o valor de 444 ensaios para determinar a probabilidade de coincidência.

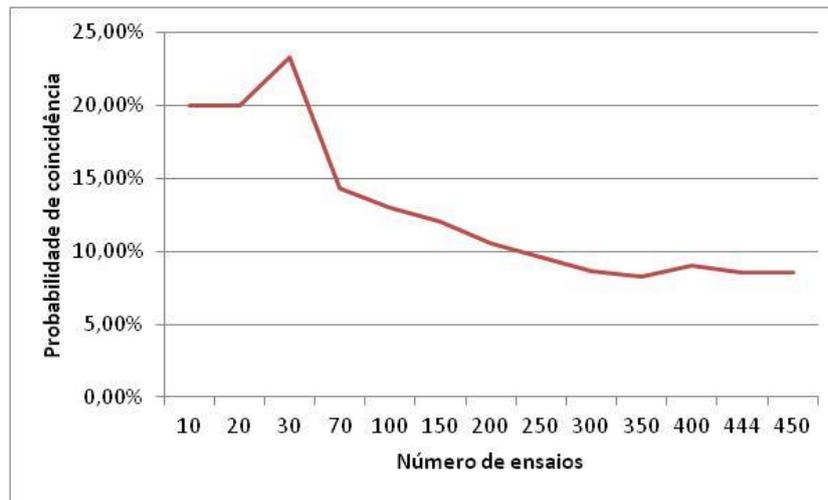


Figura 9 - Relação resultado vs número de ensaios

Depois de testado o modelo construído na folha de cálculo para determinar a probabilidade de coincidência, e analisados os resultados obtidos, é possível garantir a sua validade com as seguintes observações:

- Quanto maior o intervalo de tempo entre inspeções, menor a probabilidade de coincidência, tendendo para zero.
- Quanto maior o tempo de degradação da falha, maior a probabilidade de ocorrência, tendendo para 100%.
- Se a periodicidade de inspeções é menor que o tempo de degradação da falha, então a probabilidade de coincidência é 100%.

Na figura 10, está representado um esquema simplificado do algoritmo criado.

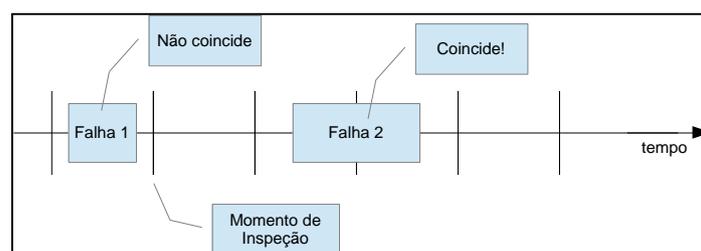


Figura 10 - Algoritmo de cálculo da probabilidade de coincidência

4.4.3. Porta lógica “Deteta?”

A porta lógica “Deteta?” simula a aplicação de uma técnica de deteção num equipamento em falha potencial. Esta porta tem duas saídas possíveis *true* ou *false*, a probabilidade de ocorrer cada uma delas durante o processo de simulação é função da detetabilidade da técnica escolhida.

Neste trabalho serão consideradas cinco técnicas de análise de condição:

1. Análise de vibrações;
2. Monitorização de parâmetros processuais;
3. Termografia;
4. Análise de óleos;
5. Inspeção visual.

A detetabilidade de cada técnica representa a sua capacidade para detetar a falha potencial, antes de ocorrer a falha funcional. Esta detetabilidade será tanto maior quanto mais cedo a falha for detetada.

O valor de detetabilidade é um valor relativo à combinação técnica-modo de falha. Ou seja, a análise de vibrações é uma técnica que poderá ter 90% de hipótese de detetar um desalinhamento, mas terá 0% de hipótese de detetar folgas em terminais elétricos. Para operacionalizar esta relação no modelo construído, terá que ser feita a correspondência de detetabilidade para cada técnica aplicada a cada modo de falha. Na porta lógica “deteta?” será introduzido o valor de detetabilidade que a técnica escolhida apresenta para o modo de falha a analisar.

Na figura 11, apresenta-se um exemplo de uma porta lógica “deteta” no fluxograma construído no Arena, com a sua janela de introdução dos parâmetros de decisão.

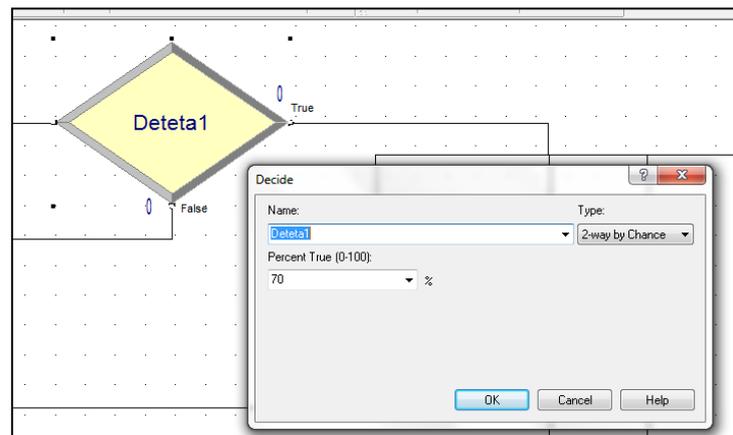


Figura 11 - Porta lógica "Deteta"

Para atribuir o valor da detetabilidade, será feita uma análise qualitativa em que o decisor terá que atribuir valores de detetabilidade para o modo de falha. Para caracterizar a detetabilidade de cada técnica foi criada a tabela 5.

Tabela 5 - Índice de detetabilidade das técnicas

Nível relativo	Detetabilidade (%)	Descrição
1	70 -100	Deteta assim que ocorre a falha potencial, ou muito próximo desta.
2	40 - 70	Deteta após alguma degradação do equipamento, mas ainda afastado da falha funcional.
3	5-40	Deteta com uma degradação do equipamento avançada, muito próximo da falha funcional.
4	0 - 5	Não deteta a falha ou deteta apenas após a falha funcional ocorrer.

4.4.4. Custos das técnicas de manutenção

O output final do modelo será um fator de decisão que quantifica o custo necessário para baixar um valor no índice de risco. Este custo é influenciado pelo custo unitário de aplicação de cada técnica de manutenção selecionada e da sua periodicidade.

Para conhecer os custos de aplicação de cada técnica de manutenção condicionada, foram recolhidas informações de empresas prestadoras deste tipo de serviços. Desta forma apresentam-se na tabela 6 os valores considerados para cada técnica.

O acompanhamento dos parâmetros de funcionamento e a inspeção visual são efetuados com homens-hora da própria organização. Porém, estes colaboradores estarão empenhados nestas tarefas e não noutras, logo deverá haver um custo para a organização. Desta forma foi considerado um custo de 7,74€ /hora por cada utilização de um técnico da própria organização. Estes dados foram consultados na página da PORDATA relativos ao ano de 2013 (PORDATA, 2015).

De acordo com a página PORDATA (2015), o salário médio de um empregado qualificado na indústria extrativa é de 792,7€/mês e na indústria transformadora 704,0€/mês. Dá uma média de salário para técnicos qualificados na indústria de 748,34€/mês. O que representa um custo de homem-hora de 7,74€/hora.

Para o cálculo da hora de trabalho, foram considerados os seguintes fatores:

- 8 Horas de trabalho diário, 5 dias por semana, 52 semanas por ano;
- 14 Ordenados por ano;
- 25 Dias de férias por ano: 200 horas;
- 6 Feriados por ano: 48 horas;
- Total de horas de trabalho: 1946,5 horas;
- Encargos com empregados:
 - Segurança social: 23,75%;
 - Subsídio de alimentação: 6,41€/dia/8h/dia: 0,8€/h.

Tabela 6 - Custos de aplicação das técnicas de manutenção

Técnica	Preço	Observações
Vibrações	90,00€ /hora	Preço médio de Hxh para medição e análise. O número de hxx varia com a complexidade da análise.
Parâmetros de funcionamento	7,74 €/h	Técnicas elaboradas por Hxx próprias da organização.
Termografia	70,00€ /hora	Preço médio de Hxx para medição e análise. O número de hxx varia com a complexidade da análise.
Análise de óleos	130,00 €	Análise à qualidade do óleo e partículas em suspensão.
Inspeção visual	7,74 €/h	Técnicas elaboradas por Hxx próprias da organização.

4.4.5. Construção das soluções de manutenção

No modelo construído, o decisor poderá selecionar até cinco técnicas de manutenção condicionada para cada modo de falha. O custo da decisão será o custo da soma das técnicas escolhidas. Contudo, é expectável que quanto mais técnicas aplicadas e menos periodicidade, melhor será a eficácia na redução do risco.

No Anexo C, apresenta-se uma tabela que reúne diferentes seleções de técnicas de manutenção para cada modo de falha, para que sejam visíveis os diferentes resultados consoante as técnicas seleccionadas.

Para o caso de estudo escolhido foram simuladas várias decisões para cada modo de falha. Cada decisão é constituída por um conjunto de técnicas de manutenção condicionada. Foi construído um conjunto completo, sobredimensionado em quantidade e periodicidade de técnicas, um económico subdimensionado, e um pacote equilibrado, que será um intermédio entre as duas decisões anteriores. Para cada técnica escolhida em cada conjunto de manutenções, foi atribuída uma detetabilidade que pode ser vista na tabela do Anexo C.

4.5. Fase 2- Simulação

Depois de calculados e carregados todos os parâmetros de simulação, é feita a simulação. Foram efetuadas simulações com 33 repetições por forma a ter um número de repetições considerável e ainda assim a simulação correr de forma rápida. Foi simulada uma duração de 1825 dias, correspondente a 5 anos que é igual ao período de recolha do histórico utilizado para o cálculo dos parâmetros. Na figura 12 apresenta-se a caixa de diálogo de introdução dos parâmetros de simulação.

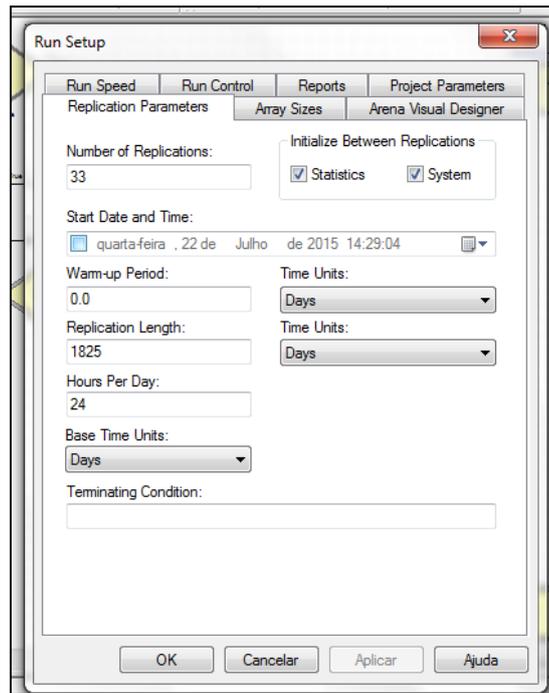


Figura 12 - Parâmetros de simulação ("Arena")

No *software* de simulação foi construído o fluxograma do modelo, sendo que, as portas lógicas “deteta” e “coincide”, foram repetidas cinco vezes. Esta repetição permite simular até cinco técnicas aplicadas a um modo de falha. Caso não se queiram simular as cinco técnicas, basta considerar 0% de coincidência na porta lógica “deteta” respetiva.

Na figura 13 está representado o fluxograma construído no *software* Arena.

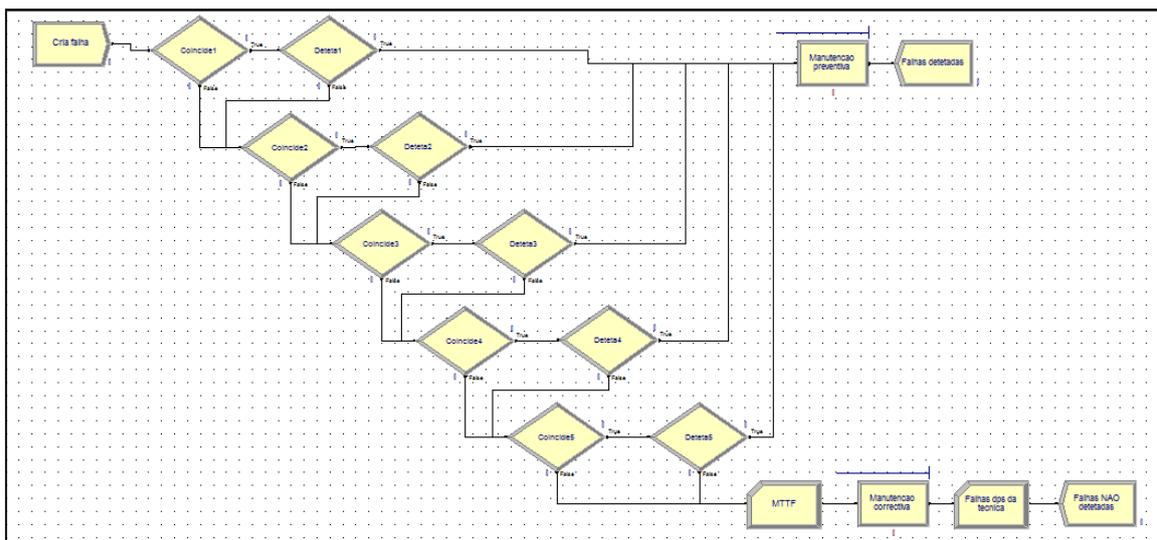


Figura 13 - Fluxograma de simulação Arena

Se a entidade falha fizer o caminho Coincide = Não, ou Deteta = Não, ao longo dos cinco blocos de técnicas, então temos uma falha funcional. Para eliminarmos a falha do fluxograma, terá que ocorrer

uma manutenção corretiva. Neste caso as falhas passam por dois contadores, o primeiro mede o tempo entre passagem de falhas antes da manutenção corretiva. A média deste valor representa o MTTF. Este valor do MTTF corresponde ao tempo entre falhas corrigido, ou seja, o valor que servirá de comparação com o MTTF antes das técnicas escolhidas. O valor de MTTF considera apenas as falhas funcionais que ocorreram depois das técnicas aplicadas, filtrando as falhas potenciais que foram corrigidas. O número de falhas potenciais corrigidas importará para fazer uma quantificação do custo de manutenção preventiva, porém não contribui para a determinação da variação do risco e por isso não será considerado neste trabalho.

O segundo contador soma o número de falhas que ocorreram no tempo de simulação.

Na figura 14, apresenta-se o módulo MTTF no fluxograma construído em Arena, com a janela de introdução dos parâmetros de contagem.

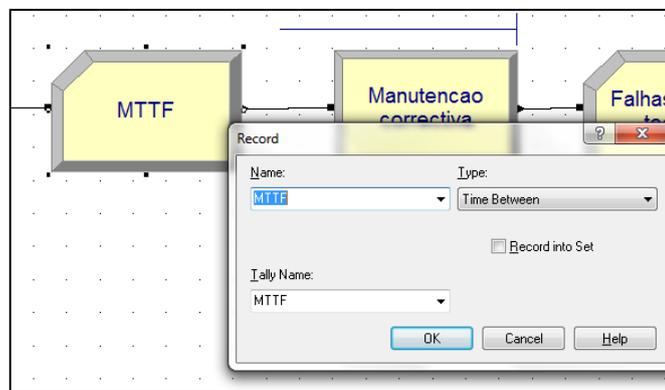


Figura 14 - Módulo "MTTF"

Na figura 15, apresenta-se o módulo de contagem de falhas, este módulo soma o valor "1" cada vez que uma entidade passa por ele.

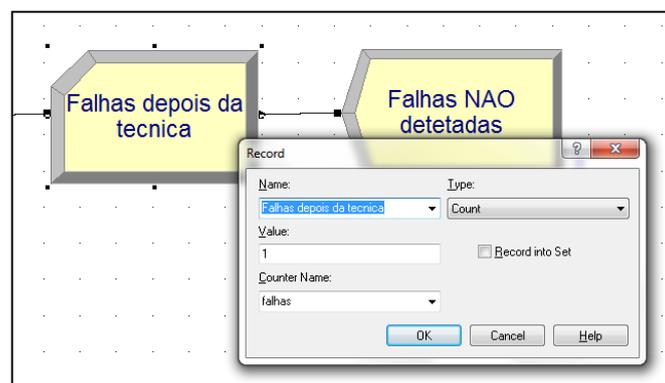


Figura 15 - Contador de falhas

Se a entidade falha fizer o caminho Coincide = Sim e Deteta = Sim, em qualquer um dos cinco blocos de técnicas, então não haverá falha funcional. O equipamento é intervencionado no período de degradação da falha potencial e continuará em funcionamento. Para tal, a entidade falha passará pelo

processo “manutenção preventiva”. Neste, caso a falha criada não irá para os resultados da simulação correspondendo a falhas evitadas pelas técnicas escolhidas.

4.6. Fase 3- Resultados

4.6.1. Apresentação de Resultados

Depois de construído o modelo e afinado para cada modo de falha em análise, foram obtidos resultados da simulação deste no *software* escolhido. Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos com as várias decisões simuladas para cada modo de falha, os resultados de cada decisão e os parâmetros tidos em conta para a simulação.

Da simulação feita ao modelo construído resultam: o número médio de falhas nos 33 ensaios, durante o período de tempo simulado (1825 dias) e o tempo médio, nos 33 ensaios, entre falhas não detetadas. Na figura 16 é possível ver um relatório efetuado pelo Arena, com os resultados obtidos de um exemplo de simulação.

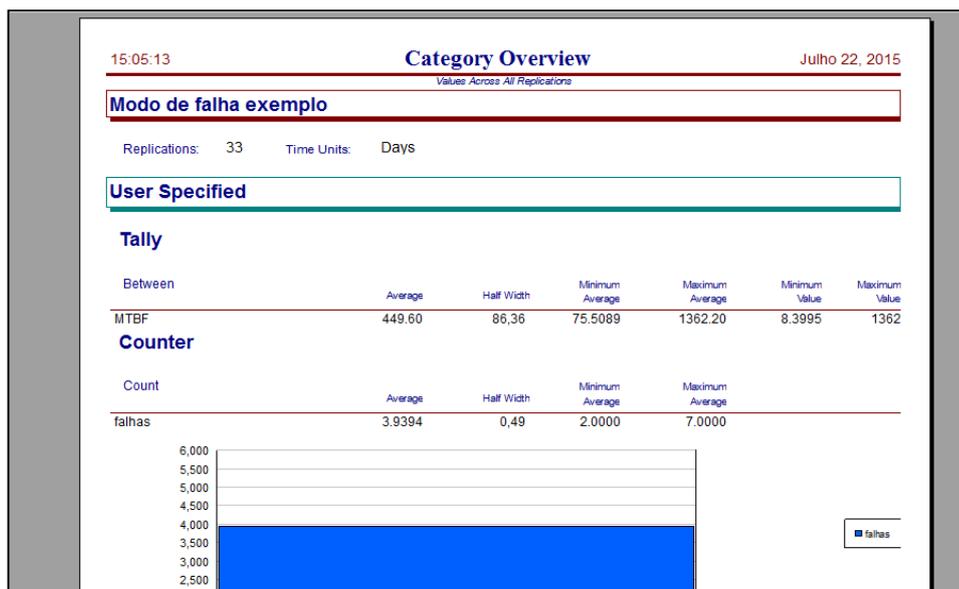


Figura 16 - Exemplo de resultados Arena

Os resultados obtidos em Arena foram transportados para uma folha Excel que compila a informação toda do modelo, os parâmetros de simulação e os resultados obtidos, resumidos na tabela 7.

Tabela 7 - Tabela resumo de parâmetros e resultados

Modo de falha		INPUT						OUTPUT										
		Antes da técnica			Tempo de ensaio (dias)			Custo Técnica de manutenção	Variação	Ocorrência corrigida	Risco corrigido	Custo v. benefício						
		Severidade	Ocorrência	Risco	Beta	Fa	MTTF											
Nr	Sistema	Modo de falha																
Sistemas de Propulsão																		
1	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	8	56,53%	4,523	1,3	420	388	1825	14.659,37 €	3,8	480,9	19,34%	45,60%	3,65	16.761 €		
1b	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	8	56,53%	4,523	1,3	420	388	1825	4.086,40 €	4,3	412	5,85%	53,23%	4,26	15.447 €		
1c	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	8	56,53%	4,523	1,3	420	388	1825	7.536,40 €	3,9	449,6	13,72%	48,78%	3,90	12.143 €		
2	Motor principal nr 2	Motor inoperacional	8	44,39%	3,551	1,3	550	508	1825	7.536,40 €	3,2	576,9	11,95%	39,09%	3,13	17.760 €		
3	Turbina nr 1	Turbina inoperacional	9	10,00%	0,9	-	-	-	1825	-	-	-	-	-	-	-		
4	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	9	61,36%	5,522	0,55	400	681	1825	28.000,80 €	3,7	336,2	-102,55%	124,28%	11,19	-4.944 €		
4b	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	9	61,36%	5,522	0,55	400	681	1825	9.893,20 €	4,2	322,9	-110,89%	129,40%	11,65	-1.615 €		
4c	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	9	61,36%	5,522	0,55	400	681	1825	14.422,00 €	3,9	292,9	-132,49%	142,66%	12,84	-1.971 €		
Sistemas de produção e distribuição de energia																		
5	Gerador nr 1	Gerador inoperacional	5	67,53%	3,377	0,6	300	451	1825	4.743,20 €	4,2	299,5	-50,71%	101,77%	5,09	-2.770 €		
6	Gerador nr 2	Gerador inoperacional	5	82,87%	4,143	1,5	250	226	1825	4.743,20 €	6,4	303,3	25,59%	61,66%	3,08	4.474 €		
7	Gerador nr 3	Gerador inoperacional	5	69,72%	3,486	0,2	150	18000	1825	4.743,20 €	2,9	196,9	-9041,70%	6373,50%	318,67	-15 €		
8	Gerador nr 4	Gerador inoperacional	5	55,17%	2,758	0,7	500	633	1825	4.743,20 €	3,1	434,5	-45,66%	80,36%	4,02	-3.766 €		
Sistemas auxiliares																		
9	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	4	91,12%	3,645	1,6	210	188	1825	25.522,29 €	4,8	393,57	52,16%	43,59%	1,74	13.424 €		
9b	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	4	91,12%	3,645	1,6	210	188	1825	17.722,29 €	5,7	309,93	39,25%	55,36%	2,21	12.388 €		
9c	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	4	91,12%	3,645	1,6	210	188	1825	20.122,29 €	5,6	340,6	44,72%	50,37%	2,01	12.345 €		
10	Grupo ar condicionado nr 2	Grupo inoperacional	4	49,44%	1,978	0,77	600	699	1825	17.722,29 €	2,5	319,8	-118,72%	108,14%	4,33	-7.548 €		
11	Compressor ar nr 1	Compressor inoperacional	5	10,00%	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
12	Compressor ar nr 2	Compressor inoperacional	5	10,00%	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

A tabela resumo está dividida em três grandes colunas. A coluna “Modo de falha” apresenta a listagem de sistemas selecionados e os respectivos modos de falha. A coluna “INPUT” apresenta os parâmetros utilizados para a simulação e a coluna “OUTPUT” apresenta os resultados obtidos depois da simulação.

Quanto aos dados da coluna “INPUT” importa referir o seguinte:

- O valor da severidade, ocorrência e risco, são os valores obtidos da FMEA e apresentados na tabela 4.
- Os valores de eta e beta para cada modo de falha foram calculados graficamente, conforme explicado no ponto 2.6.1.
- O valor de MTTF antes da simulação foi calculado pela aplicação da equação 4. A função gama (Γ) é disponibilizada pela folha de cálculo em utilização.

$$MTTF = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4)$$

- O tempo de ensaio é de 1825 dias, ou seja, 5 anos, conforme explicado no ponto 4.5. do presente trabalho.
- O custo da técnica é o valor de implementação das técnicas selecionadas para o respetivo modo de falha. Este valor é função do valor das técnicas escolhidas para o modo de falha e das respetivas periodicidades. A expressão que determina o valor do custo da técnica está representada na equação 5. O Anexo C apresenta uma tabela com os custos de implementação das técnicas selecionadas para cada modo de falha.

$$C_t = \Sigma(P_i \times C_i) \quad (5)$$

C_t : custo total de implementação da solução escolhida;

P_i : periodicidade para a técnica i ;

C_i : custo da técnica i .

Na coluna “OUTPUT”, apresentam-se os resultados obtidos depois da simulação. Com os seguintes apontamentos:

- O número de falhas e o novo MTTF são obtidos diretamente do relatório de resultados do Arena, resultado dos contadores introduzidos.
- O valor da variação corresponde à diferença entre MTTFs antes e depois das técnicas aplicadas. Este valor será multiplicado pelo valor da ocorrência inicial e assim obtém-se o valor da ocorrência corrigido.

$$Variação = \frac{Novo\ MTTF - MTTF\ inicial}{Novo\ MTTF} \quad (6)$$

- Com o novo valor de ocorrência, sendo que a severidade se mantém, obtém-se o novo valor do risco de falha, resultado do conjunto de técnicas de manutenção escolhido.

$$Ocorrência\ corrigida = Variação\ (\%) \times Ocorrência\ inicial \quad (7)$$

$$Risco\ corrigido = Severidade \times Ocorrência\ corrigida \quad (8)$$

- Na última coluna é feita uma relação entre o custo e o benefício, apresentado como o custo necessário para reduzir um valor no índice do risco.

$$Indicador\ custo\ vs\ benefício = \frac{Custo\ das\ técnicas}{Risco\ inicial - Risco\ corrigido} \quad (9)$$

4.6.2. Análise de Resultados

Depois de simuladas as várias decisões consideradas, e apresentados os resultados obtidos, é feita uma análise destes para perceber como se comporta o modelo construído, para os diferentes modos de falha e como pode apoiar a decisão.

A tabela 7 resume os resultados obtidos com os parâmetros inseridos. Para perceber quais as decisões, ou seja, as técnicas aplicadas em cada simulação de cada modo de falha, deverá ser consultada a tabela do Anexo C.

Serão de seguida analisados os resultados de alguns modos de falha, que demonstrem o comportamento do modelo para diferentes parâmetros introduzidos.

1. Motor principal de estibordo, modo de falha nr. 1.

Neste modo de falha simularam-se três opções distintas de técnicas de manutenção condicionada. Uma opção mais completa e por isso mais cara (1), uma opção mais económica (1b) e uma terceira equilibrada entre as duas últimas (1c).

Com a solução mais completa, a variação da ocorrência é de 19% enquanto a económica de 6% e a equilibrada de 14%.

Na avaliação do risco, a solução económica não serve o propósito, sendo que o risco antes e depois das técnicas escolhidas continua acima de 4, ou seja, risco tolerável, quando o objetivo é risco aceitável.

Entre a solução completa e a equilibrada, ambas reduzem o risco abaixo de 4. Porém, no indicador custo vs benefício, a solução equilibrada apresenta melhor resultado. Sendo que com a solução equilibrada custam 12.143,00€ para reduzir um valor o índice de risco, contra 16.761,00€ da completa.

Para este modo de falha, o modelo comportou-se conforme esperado, simulou as decisões tomadas, apresentou resultados e é possível escolher a solução que reduz o risco de forma mais eficiente, ou seja com o mínimo de recursos.

2. Turbina nr 2.

No sistema turbina nr. 2 os valores de Beta foram todos inferiores a 1, ou seja, pode-se considerar que o equipamento se encontra na fase de mortalidade infantil no seu ciclo de vida. Verificou-se que o risco corrigido obtido da simulação é superior ao risco inicial. O fato de existir um risco aumentado neste modo de falha, acontece porque na fase de mortalidade infantil a taxa de avarias reduz ao longo do tempo. Com esta redução temos um aumento do tempo entre falhas (MTTF). Este MTTF é que vai corrigir o índice de ocorrência depois das técnicas. Ou seja, com o aumento do tempo de simulação para 10 anos, verifica-se um aumento de MTTF, para 15 anos continua o aumento, e assim constantemente. Por outro lado, para um tempo de simulação de 20 anos já haveria uma redução do risco.

Contudo, os equipamentos não permanecem 20 anos em fase de mortalidade infantil. Para estes casos o modelo não consegue simular decisões de manutenção condicionada. Para casos onde os equipamentos se encontram em fase de mortalidade infantil, com beta inferior a 1, o modelo construído não consegue simular a seleção de técnicas de manutenção condicionada. Nestes casos recomenda-se a adoção de outras políticas de manutenção para reduzir o risco, como reengenharia do sistema, visto que este caso ocorre em fases excepcionais da vida do equipamento.

O erro associado ao facto de os sistemas não estarem decompostos ao nível dos componentes, poderá induzir erro que induza um valor de beta inferior a 1. Sendo que é necessário melhorar o histórico para comprovar esta situação, será um fator a verificar no futuro com a melhoria recomendada na recolha dos dados de falha.

3. Sistemas de produção e distribuição de energia.

Este sistema é composto por quatro equipamentos, cada um com o seu modo de falha e os seus parâmetros de simulação. Neste modo de falha, foi usada a mesma decisão de manutenção, para comparar como se comporta o modelo com os mesmos parâmetros de simulação exceto os parâmetros de criação de falha, que dependem do histórico de cada modo de falha.

Os parâmetros de Weibull dos quatro geradores são diferentes, porém, apenas o gerador 2 apresenta beta superior a 1. Os geradores 1, 3 e 4, por terem beta inferior a 1, pode-se considerar que se encontram no período de mortalidade infantil.

O modelo para o gerador número 2, apresenta um risco corrigido de 3.08 contra 4.14 do risco inicial. Comprova que a decisão de manutenção reduziu o risco para níveis aceitáveis.

Nos modos de falha 1, 3 e 4, onde existem equipamentos com beta inferior a 1, o modelo apresenta um risco corrigido superior ao risco inicial. Este comportamento do sistema repete-se para todos os modos de falha que tenham beta inferior a 1 conforme explicado na análise dos resultados para a turbina nr 2.

Neste caso seria recomendável adotar outras políticas de manutenção, como reengenharia do sistema.

4. Grupo de ar condicionado nr. 1

No grupo de ar condicionado nr. 1, à semelhança do motor principal de nr. 1, foram simuladas três soluções de manutenção condicionada. Neste caso, o risco inicial estava dentro do aceitável, mas ainda assim pretende-se ver qual das soluções permite uma redução mais eficiente. Ciaram-se três soluções de manutenção, uma completa mais cara (9), uma económica (9b) e uma equilibrada (9c).

Com a solução mais completa a variação da ocorrência é de 52.16%, enquanto a económica é de 39.25% e a equilibrada 44.72%.

Na avaliação do risco deste modo de falha todas as soluções partem de um risco aceitável (3,64), desta forma o risco corrigido será sempre dentro do aceitável. Ainda assim, a solução completa permite reduzir o risco para 1,74, a versão económica para 2,21 e a equilibrada para 2,01.

O índice de eficiência obtido na solução completa é de 13.424,00€/risco na versão económica 12.388,00€/risco e na equilibrada 12.345,00€/risco. O índice de eficiência entre a opção 9b e a opção 9c é muito próximo, com uma diferença de 0.03%. Desta forma é recomendável optar pela solução mais económica, visto que se considera que a eficiência das soluções equivalente.

5. Compressores de ar comprimido

Os compressores de ar comprimido representados nos modos de falha 11 e 12 não tiveram qualquer falha durante o período de observação do histórico recolhido. Desta forma, considerou-se que o índice de ocorrência seria de 10%. Foi considerado que seria o valor mínimo de ocorrência para não obter risco nulo. Não existindo histórico de ocorrência destes modos de falha, não é possível determinar os parâmetros da distribuição de *Weibull*, limitando o algoritmo de simulação criado. Contudo, estes modos de falha têm risco aceitável e perto do mínimo, pelo que não se justifica alterar o seu plano de manutenção com vista à redução do risco de falha.

Capítulo 5 – Conclusões

O objetivo proposto e apresentado no início deste trabalho era a criação de um modelo que permitisse ensaiar a escolha de técnicas de manutenção condicionada num equipamento e desenvolver a sua simulação dinâmica para observar os resultados esperados. Como resultado, é visível o impacto na redução do risco de falha do equipamento e o custo de implementação. A observação destes indicadores será o caminho para a otimização da manutenção, reduzindo o risco de falha da forma mais eficiente possível.

Para alcançar o objetivo proposto foi selecionado um caso de estudo, de onde foram recolhidos dados para ensaiar o modelo construído com o *software* de simulação escolhido, o Arena.

Dos resultados obtidos e analisados no capítulo 4, verifica-se que a simulação do modelo criado consegue simular as decisões para equipamentos que estejam no período de vida de exploração ou degradação.

Depois de selecionadas as técnicas para o equipamento em estudo, o modelo apresenta a redução do risco e calcula um indicador que permite comparar decisões.

Desta forma, conclui-se que o modelo criado é útil para ensaiar a seleção de técnicas de manutenção condicionada com o apoio do *software* de simulação Arena, e assim, perceber o impacto destas decisões na otimização da manutenção reduzindo o risco de falha, tendo como variáveis de decisão o custo das técnicas. Este método é assim útil ao engenheiro da manutenção na sua análise, na medida em que permite projetar no futuro o comportamento dos equipamentos com as suas decisões e pode ainda simular condições de operação diferentes, mais ou menos exigentes.

A simulação do modelo teve por base alguns pressupostos que devem ser tomados em atenção para a aplicação do algoritmo apresentado.

1. A detetabilidade de cada técnica de manutenção condicionada a cada modo de falha é definida de forma qualitativa, analisando matrizes tendo por base a experiência do decisor.
2. O tempo de degradação dos equipamentos, ou seja, o período de tempo decorrido entre o surgimento da falha potencial e o acontecimento da falha funcional é desconhecido. Este período é importante para modelar a porta lógica “coincide?”. Um período aproximado, com base na experiência do decisor, permitirá correr a simulação do modelo uma vez que o erro afetará todas as decisões na mesma proporção.

3. Uma premissa base para simular o modelo é conhecer o histórico de falhas do equipamento. Este histórico é que permitirá conhecer os tempos entre falhas, necessários para avaliar o comportamento do sistema antes e depois da seleção de técnicas de manutenção.

A qualidade dos dados recolhidos também influenciará a qualidade do modelo. Foi referido que a decomposição dos sistemas em equipamentos e componentes ficou limitada pela inexistência de dados de histórico dos modos de falha dos componentes. Quanto mais descritivo e completo for o histórico, maior será a possibilidade de aplicação do modelo ao nível mais decomposto dos sistemas e mais próximo da realidade estarão os resultados simulados.

Esta premissa representa a maior dificuldade na modelação destes sistemas de decisão. É prova que quanto mais madura for uma organização na recolha e tratamento dos dados, e na compilação de um histórico fiável, mais aproximado da realidade será o modelo construído neste trabalho e melhor apoio dará à decisão permitindo obter melhores resultados no futuro.

Desta forma, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos futuros para melhorar o modelo construído e torna-lo o mais real possível, podendo ser aplicado a qualquer caso de estudo da forma mais automática possível. Nomeadamente:

1. Investigar a possibilidade de quantificar a eficácia de técnicas de manutenção condicionada para modos de falha típicos. Um modelo que quantificasse este valor reduziria a subjetividade do valor aplicado na porta lógica “deteta”. Para desenvolver este estudo seria necessário avaliar de que forma é que cada uma das técnicas de manutenção condicionada deteta a mesma falha. Este estudo teria de ser desenvolvido para cada modo de falha tipo.
2. Investigar a possibilidade de modelar matematicamente o período de degradação P-F e conhecer quais as variáveis que o influenciam. A possibilidade de conhecer o período P-F possibilitaria a redução de erro associado à porta “coincide”, e assim obter uma simulação mais próxima da realidade.

A construção de um modelo tem como objetivo criar uma ferramenta que represente de forma mais aproximadamente possível o comportamento da realidade. Com a ferramenta de simulação dinâmica apresentada neste trabalho, é possível testar o modelo construído e verificar o comportamento esperado da realidade face às decisões em estudo. A qualidade do modelo está diretamente relacionada com a proximidade à realidade disponibilizada. Como referiam Box e Draper (1987), todos os modelos estão essencialmente errados, porém, alguns poderão ser úteis. Ou seja, um modelo nunca representará a realidade na sua totalidade devido à complexidade natural desta, porém, a possibilidade de simular a realidade conhecendo as limitações do modelo, poderá servir para melhorar o desempenho de sistemas reais com processos complexos.

Referências

- Abernethy, D. R. B. (2001), 'The New Weibull Handbook'. Fourth Edition ed. USA – Florida.
- Arunraj e Maiti (2006), 'Risk-based maintenance - Techniques and applications'. Journal of Hazardous Materials, vol 142 (2007) pp. 653-661.
- Assis, R. (2010). 'Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos'. Primeira Edição, LIDEL.
- Box e Draper (1987), 'Empirical Model-building and Resonse Surfaces', 1ª edição.
- Brigas, J. J. C. (2008), RBIM - Inspeção e Manutenção Baseada no Risco, Dissertação de Mestrado Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Carinhas, H. P. (2010), 'Tribologia'. Lisboa: ISEL - Departamento de Engenharia Mecânica.
- Carleton College (2015), 'What is a model?'. Obtido através da Internet: <http://serc.carleton.edu/introgeo/models/WhatIsAModel.html> [acedido em Julho de 2015].
- Department of Defense - USA (1980), 'MIL-STD-1629A - Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis', Norma Militar.
- Guo C., Wang W., Guo B. e Si X. (2013), 'A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation', Reliability Engineering and System Safety, Volume 111, pp. 183-194.
- Hillier, F. e Lieberman, G. (2001), 'Introduction to Operations Research', Seventh Edition ed. McGraw-Hill.
- Instituto Português da Qualidade (2007), 'Terminologia da Manutenção', Caparica: IPQ.
- International Standard Organization (2009), 'ISO 31000:2009 - Risk Management - Principles and Guidelines'.
- International Standard Organization (2009), 'ISO 31010 - Risk management - Risk assessment techniques'.
- Investor Words (2015), 'Model', Obtido através da Internet: <http://www.investorwords.com/5662/model.html> [acedido em Julho de 2015].
- International Organization for Standardization (2014), 'ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology', Switzerland.
- Kumar e Maiti (2012), 'Modeling risk based maintenance using fuzzy analytic network process'. International Journal: Expert Systems with Applications, Volume 39, pp. 9946-9954.
- Khan e Haddara (2003), 'Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning', Journal of Loss Prevention in the process industries, vol. 16 (2003), pp. 561-573.

Krishnasamy, Khan e Haddara (2005), 'Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant', Journal of Loss Prevention in the process industries, vol. 18 (2005) pp. 69-81.

Marinha (2015), 'Marinha - Meios e Operações', Obtido através da Internet: <http://www.marinha.pt/pt-pt/meios-operacoes/armada/navios/fragatas/Paginas/NRP-Alvares-Cabral.aspx>, [acedido em Junho de 2015].

Mobley, R. Keith (2002), 'An Introduction to Predictive Maintenance'. Second Edition ed., Butterworth Heinmann.

Moubray, J. (1997), 'Reliability Centred Maintenance', Second Edition ed. Nova York: "Industrial Press Inc."

Nielsen e Sorensen (2012), 'Maintenance Optimization for Offshore Wind Turbines using POMDP', Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems 2012, Yerevan, Armenia.

Nowlan e Heap (1978), 'Reliability Centered Maintenance', California, USA: Dolby Access Press.

Paulo Sá Marques (2007), Simulação de um Sistema Automático de Logística Interna para a Indústria de Calçado. Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto, Porto.

PORDATA (2015), 'Base de Dados Portugal Contemporâneo'. Obtido através da Internet: <http://www.pordata.pt/Portugal/Remunera%C3%A7%C3%A3o+base+m%C3%A9dia+mensal+dos+trabalhadores+por+conta+de+outrem+total+e+por+sector+de+atividade+econ%C3%B3mica-363> [acedido em Julho de 2015].

ReliaSoft Corporation (2007), 'On-Condition Maintenance Using P-F Interval or Failure Detection Threshold'. Obtido através da Internet: <http://www.weibull.com/hotwire/issue76/hottopics76.htm> [acedido em Julho de 2015].

Rockwell Automation (2012), 'Getting Started With Arena', USA: Allen-Bradley.

Santos, J., Barata, H., Cordeiro, H., Sobral, J. (2014a), 'Life Cycle Cost Optimization through an Asset Management based on Risk Principles', Artigo apresentado na Conferência "Maintenance Performance Measurement and Managment". Setembro de 2014, Coimbra, FCTUC.

Santos J., Calado J., Roque A. (2014b), 'Risk-based maintenance: Relationship between the risk and the environment of operation'. Artigo apresentado na Conferência "Maintenance Performance Measurement and Managment". Setembro de 2014, Coimbra, FCTUC.

Sarker, R. e Haque, A. (2000), 'Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation', Applied Mathematical Modelling, Volume 24, pp. 751-760.

Smith, J. David (2001), 'Reliability, Maintability and Risk', Sixth Edition ed. :Butterworth Heinemann.

Sobral, J. (2014), 'Aulas de Gestão da Manutenção'. Lisboa: ISEL - DEM.

The Woodhouse Partnership Ltd (2015), 'ISO 55000 Standards for Asset Management'. Obtido através da Internet: <http://www.assetmanagementstandards.com/> [acedido em Maio de 2015].

The Woodhouse Partnership Ltd (2015), 'PAS55' Obtido através da Internet: <http://www.assetmanagementstandards.com/pas-55/> [acedido em Agosto de 2015].

Yang e Hsu (2010), 'Risk-Based Multiobjective Optimization Model for Bridge Maintenance Planning', AIP Conference Proceedings, vol. 477 (2010).

Wang, Cheng, Hu e Wu (2012), 'Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant', Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 25 (2012) pp. 958-965.

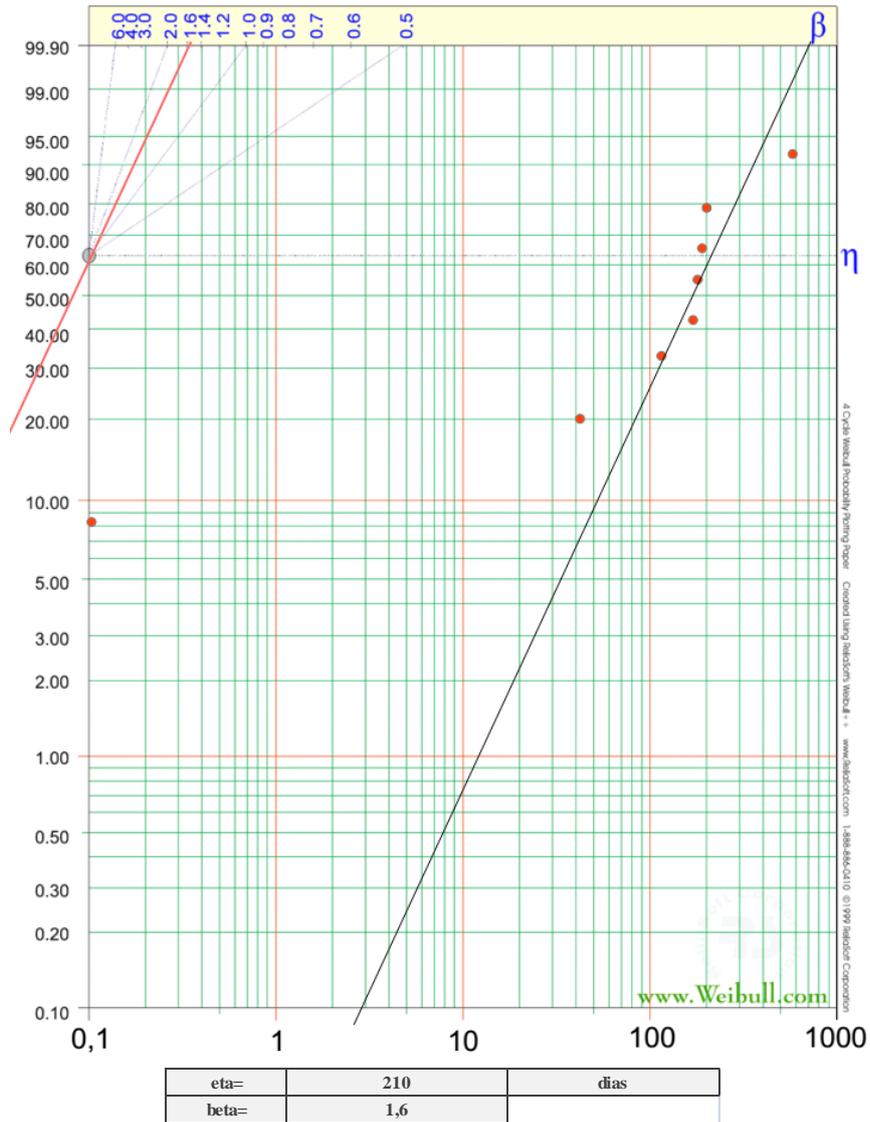
Anexos

Anexo A – Cálculo dos parâmetros de Weibull

Neste anexo é demonstrada a folha de cálculo construída para determinar os parâmetros de Weibull dos vários equipamentos em análise, assim como a representação gráfica em papel de Weibull que serviu para a determinação dos parâmetros.

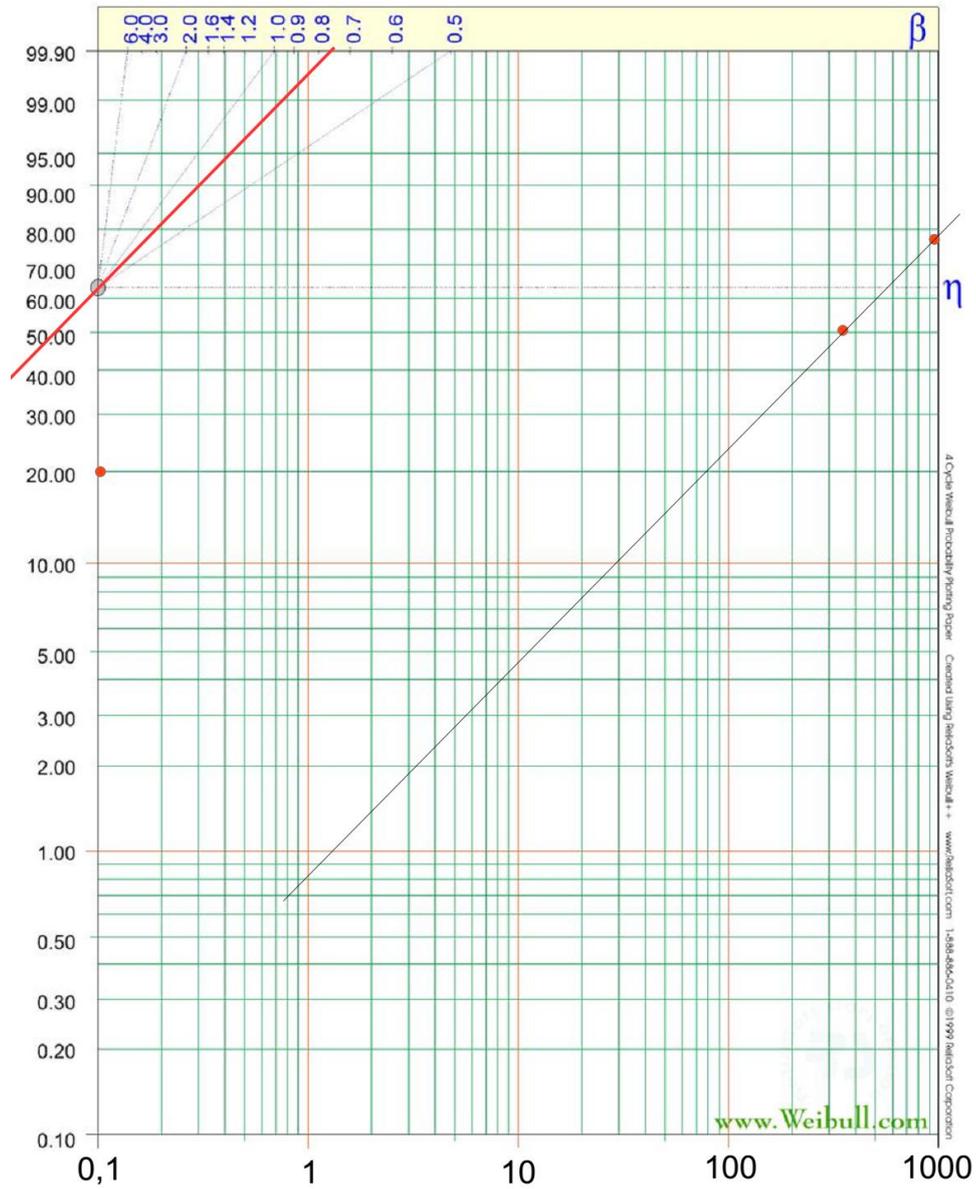
Anexo A.1. – Ar condicionado nr. 1

j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	ACAV	09-07-2010	26-12-2011	535,00	0,00	0,08333	8,3
2	ACAV	12-04-2013	22-04-2013	10,57	43,00	0,20238	20,2
3	ACAV	28-02-2013	20-03-2013	20,49	134,00	0,32143	32,1
4	ACAV	30-09-2013	27-11-2013	58,81	171,00	0,44048	44,0
5	ACAV	10-10-2014	16-10-2014	6,02	178,00	0,55952	56,0
6	ACAV	17-10-2012	21-10-2012	4,93	181,00	0,67857	67,9
7	ACAV	15-04-2014	01-01-2015	261,00	197,00	0,79762	79,8
8	ACAV	19-04-2012	04-09-2012	138,36	650,00	0,91667	91,7



Anexo A.2. – Ar condicionado nr. 2

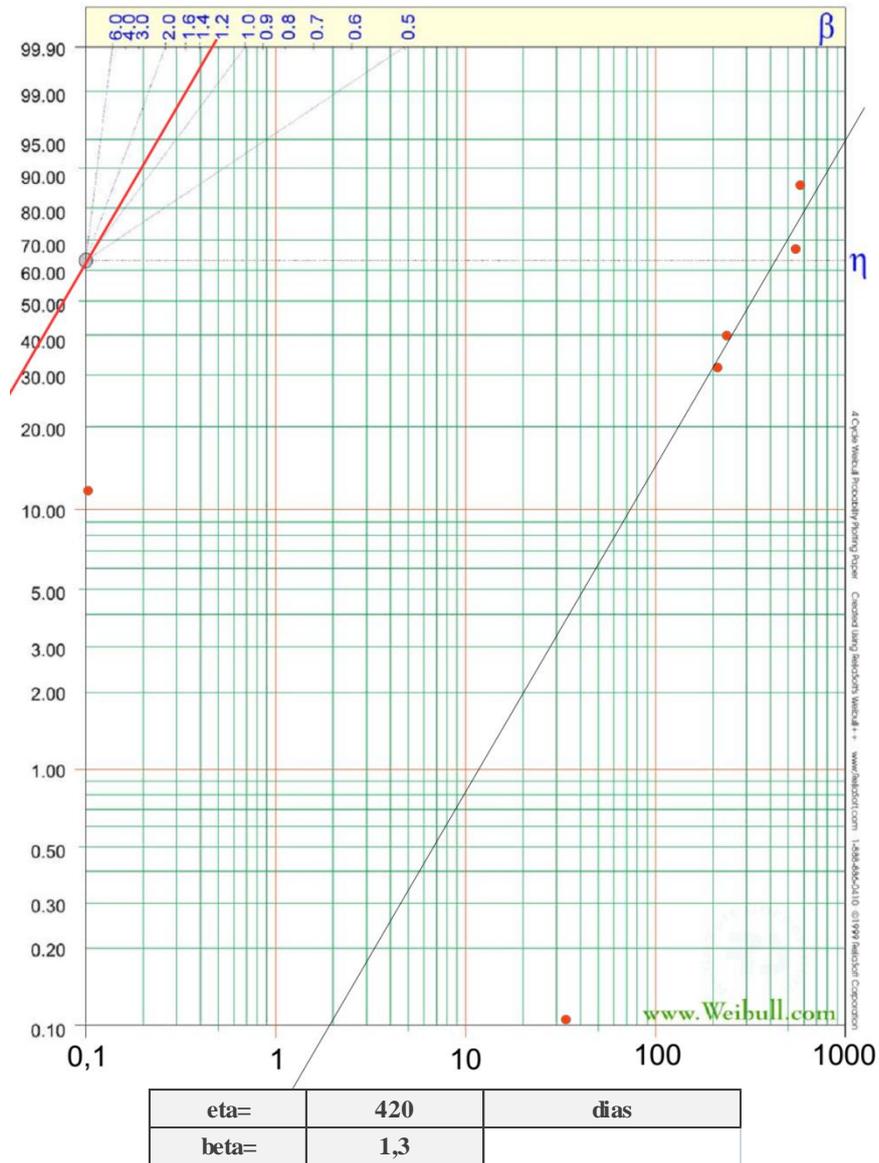
j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	AC AR	06-05-2010	25-05-2010	19,00	0	0,20588	20,6
2	AC AR	29-11-2013	04-08-2014	247,76	351	0,50000	50,0
3	AC AR	13-12-2012	28-02-2013	76,90	953	0,79412	79,4



eta=	600	dias
beta=	0,77	

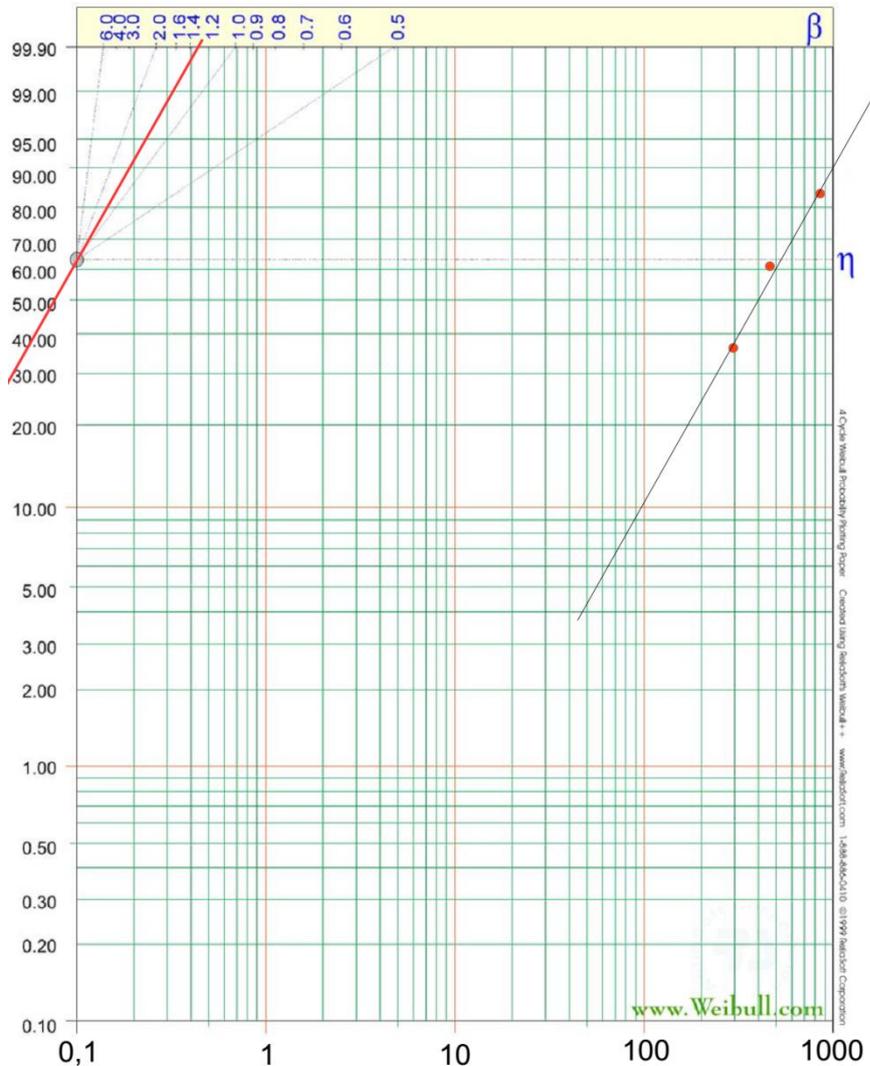
Anexo A.3. – Motor Diesel nr. 1

j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	motor eb	25-Ago-10	26-Dez-11	488,00	0,00	0,12963	13,0
2	motor eb	26-Out-12	28-Out-12	1,35	214	0,31481	31,5
3	motor eb	23-Jun-13	24-Jun-13	1,21	240	0,50000	50,0
4	motor eb	06-Jan-15	26-Fev-15	50,73	562	0,68519	68,5
5	motor eb	26-Mar-12	23-Jul-12	118,24	580	0,87037	87,0



Anexo A.4. – Motor Diesel nr. 2

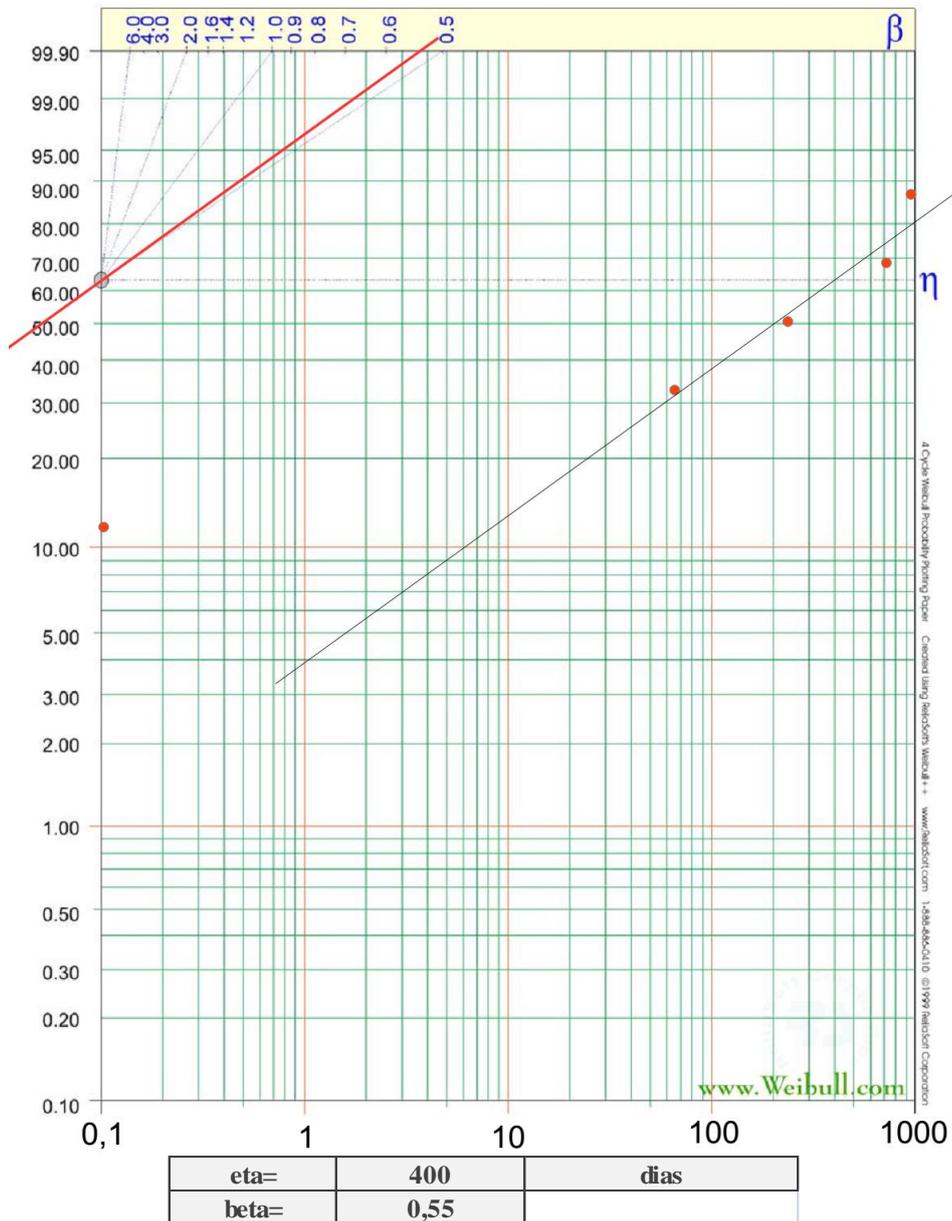
j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	motor bb	25-08-2010	26-12-2011	488,00	0,00	0,15909	15,9
2	motor bb	19-11-2013	16-10-2014	331,91	301	0,38636	38,6
3	motor bb	24-03-2015	30-03-2015	5,71	491	0,61364	61,4
4	motor bb	21-01-2013	01-02-2013	10,94	881	0,84091	84,1



eta=	550	dias
beta=	1,3	

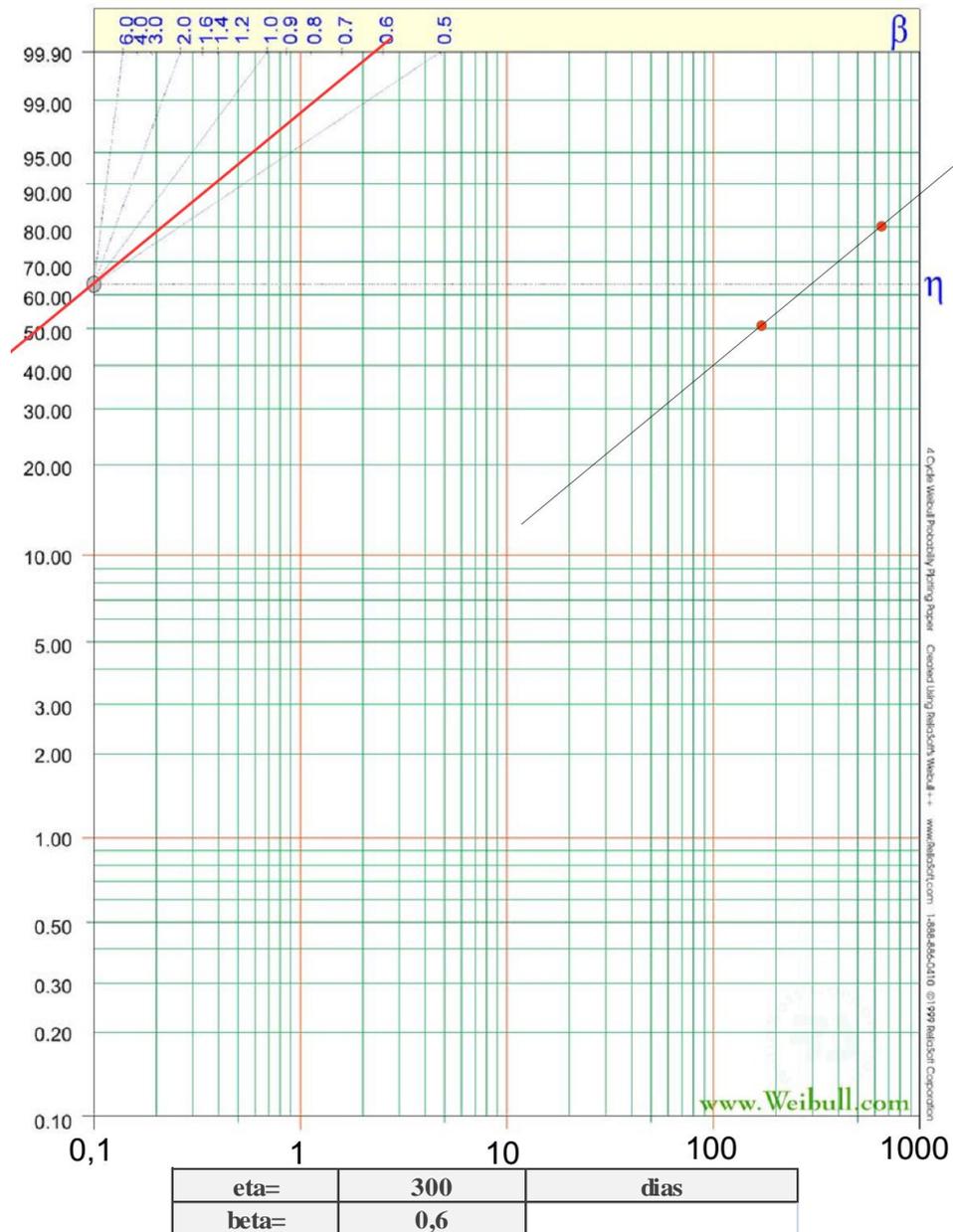
Anexo A.5. – Turbina nr. 2

i	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	tg bb	03-03-2010	16-04-2010	44,00	0,00	0,12963	13,0
2	tg bb	09-10-2012	15-10-2012	5,40	16	0,31481	31,5
3	tg bb	19-10-2010	26-12-2011	433,00	230	0,50000	50,0
4	tg bb	24-09-2012	19-02-2013	148,49	706	0,68519	68,5
5	tg bb	25-05-2015	01-08-2015	67,58	957	0,87037	87,0



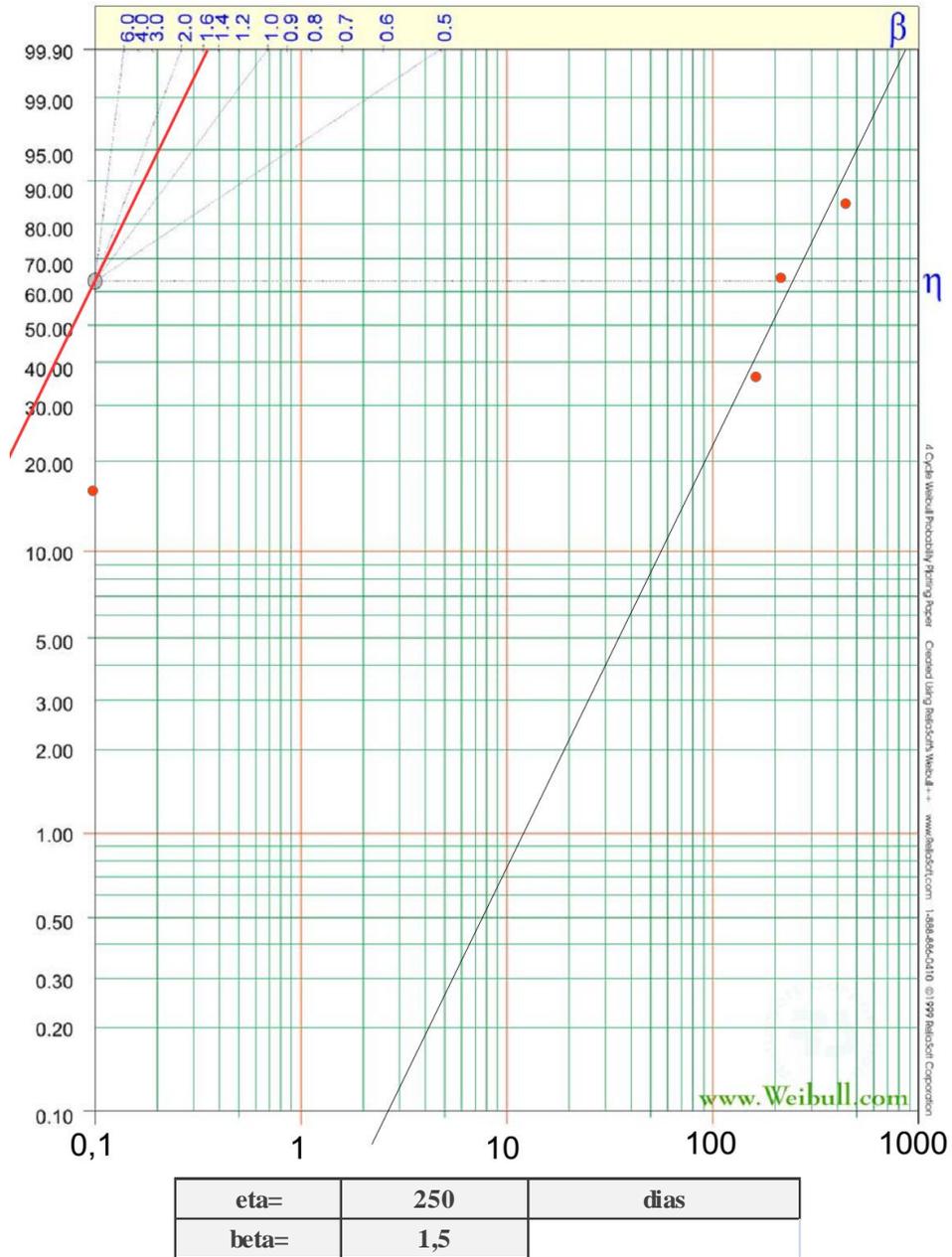
Anexo A.6. – Grupo gerador nr. 1

i	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	ge1	06-09-2010	26-12-2011	476,00	0	0,20588	20,6
2	ge1	24-01-2013	07-02-2013	14,09	186	0,50000	50,0
3	ge1	23-07-2012	26-07-2012	3,44	686	0,79412	79,4



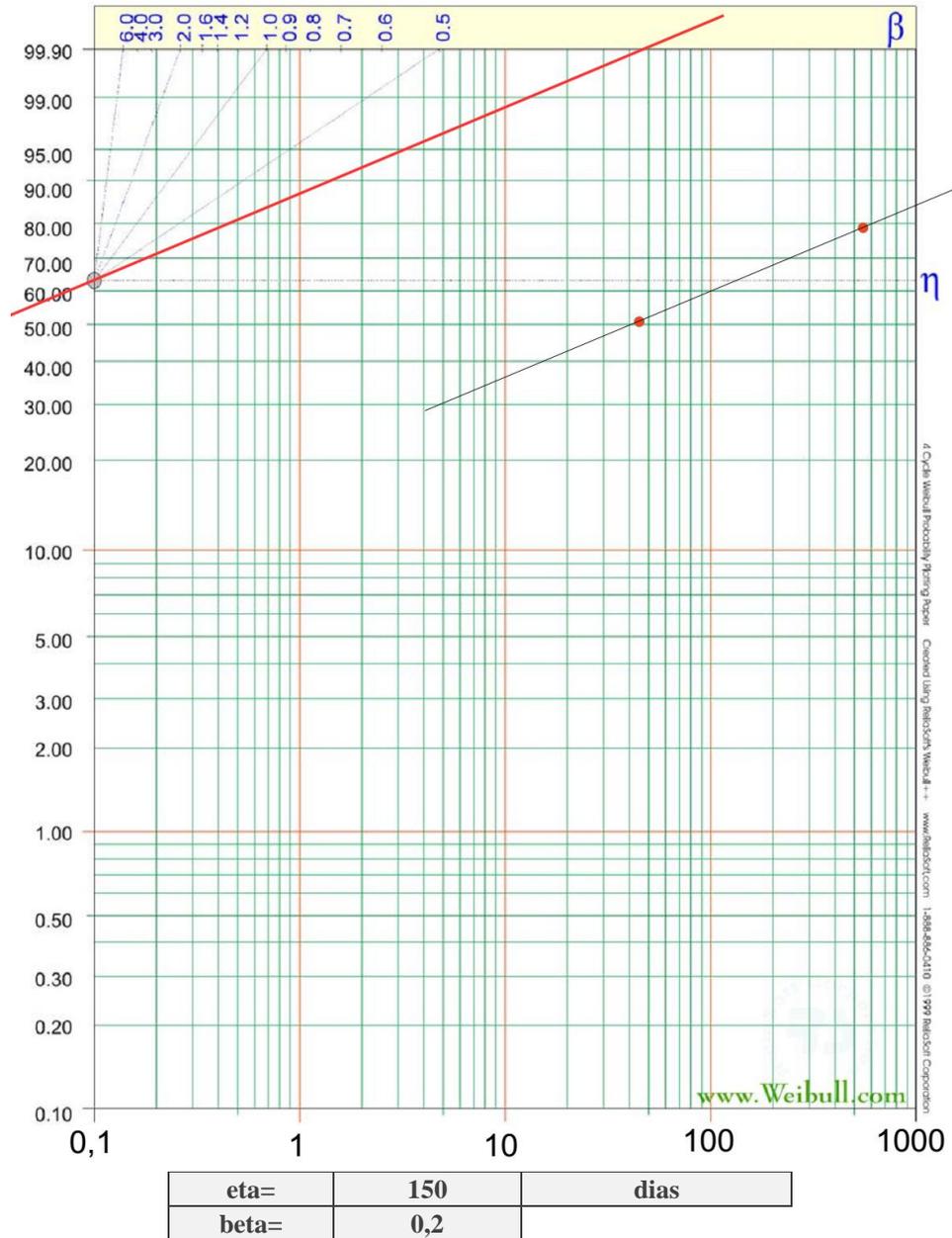
Anexo A.7. – Grupo gerador nr. 2

j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	ge 2	06-09-2010	26-12-2011	476,00	0	0,15909	15,9
2	ge 2	04-07-2012	16-07-2012	12,00	182	0,38636	38,6
3	ge 2	22-02-2013	01-03-2013	6,95	233	0,61364	61,4
4	ge 2	04-01-2012	20-02-2012	47,06	485	0,84091	84,1



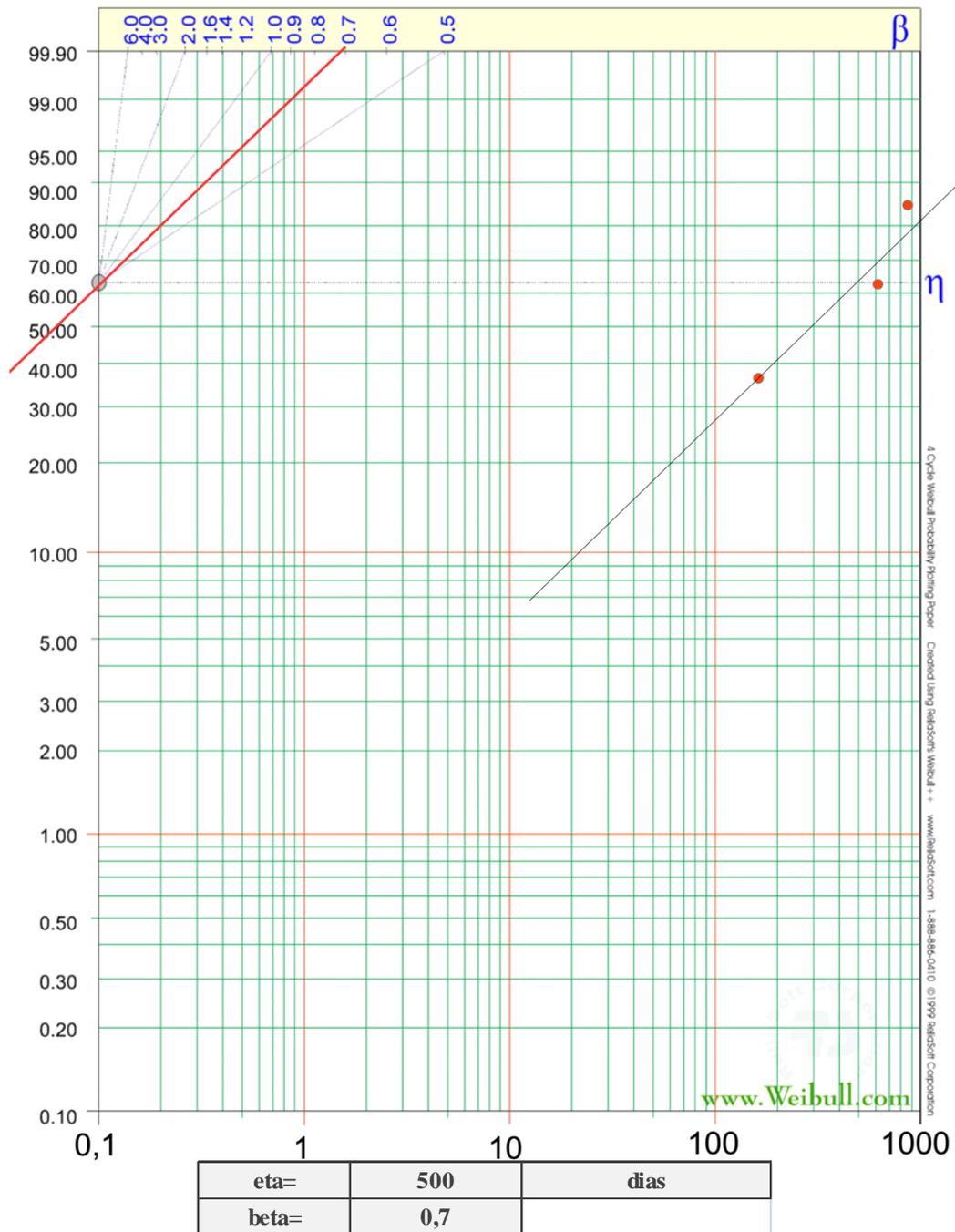
Anexo A.8. – Grupo gerador nr. 3

i	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	GE3	14-01-2013	16-07-2012	-181,93	0	0,20588	20,6
2	GE3	26-02-2013	01-03-2013	2,92	43	0,50000	50,0
3	GE3	09-10-2014	26-12-2011	-1018,45	590	0,79412	79,4



Anexo A.9. – Grupo gerador nr. 4

j	Sistema	Data falha	Data da resolução	TBF (DIAS)	TTF (DIAS)	Median rank	%
1	GE6	02-06-2010	09-11-2010	160,00	0	0,15909	15,9
2	GE7	25-11-2010	26-12-2011	396,00	176,00	0,38636	38,6
3	GE4	10-10-2014	14-10-2014	4,20	611,00	0,61364	61,4
4	GE5	06-02-2013	19-02-2013	13,25	804,00	0,84091	84,1



Anexo B – Cálculo da probabilidade de Coincidência.

Neste anexo apresenta-se um exemplo da folha de cálculo utilizada para determinar a probabilidade de coincidência entre a técnica de manutenção escolhida e a falha. O resultado é função da periodicidade selecionada e do tempo de degradação estabelecido.

Ti (f. potencial)	Tf (f. funcional)	Períodos de inspeção										falhas detetadas	
		30	60	90	120	150	180	210	240	270	300		
181	185	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
295	299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
288	292	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
278	282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
251	255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
275	279	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
97	101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
268	272	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I	0	I
285	289	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
174	178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
225	229	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
134	138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
116	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
131	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
152	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
226	230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
194	198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
245	249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
268	272	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I	0	I
169	173	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	61	0	I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I
24	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
257	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
114	118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
279	283	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
216	220	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
265	269	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
152	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
267	271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I	0	I
219	223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
272	276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4 tempo de degradação (dias)
 30 tempo entre inspeções (dias)
 26 diferença entre intervalo de tempos (dias)

10%	Prob de coincidência	445 ensaios
10%		

Observações:
 Quando o tempo entre inspeções é menor que o tempo de degradação, a probabilidade de coincidência é 1
 O valor da diferença entre os intervalos em jogo (degradação e inspeção) é inversamente proporcional à probabilidade de coincidência
 O valor do tempo de degradação depende do modo de falha. Terá que ser obtido por experimentação ou com base no histórico. É a curva P-F.

Anexo C – Seleção de Técnicas de Manutenção

Neste anexo é apresentada a tabela que reúne as decisões tomadas no modelo. Ou seja, as técnicas selecionadas para cada modo de falha.

Nr	Modo de falha		Vibrações				Parâmetros funcionamento			
	Sistema	Modo de falha	detetabilidade	periodicidade (d)	prob coincidência	CUSTO	detetabilidade	periodicidade (d)	prob coincidência	CUSTO
<i>Sistemas de Propulsão</i>										
1	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	60	180	4,0%	3.600 €	50	30	23,0%	929 €
1b	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	60			0 €	50	30	23,0%	929 €
1c	Motor principal nr 1	Motor inoperacional	60			0 €	50	30	23,0%	929 €
2	Motor principal nr 2	Motor inoperacional	60			0 €	50	30	23,0%	929 €
4	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	80	90	2,0%	14.400 €	50	30	7,6%	1.393 €
4b	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	80	180	1,3%	7.200 €	50	90	2,3%	464 €
4c	Turbina nr 2	Turbina inoperacional	80	120	1,3%	10.800 €	50	30	10,1%	1.393 €
<i>Sistemas de produção e distribuição de energia</i>										
5	Gerador nr 1	Gerador inoperacional	60			0	50	30	23,0%	464 €
6	Gerador nr 2	Gerador inoperacional	60			0	50	30	23,0%	464 €
7	Gerador nr 3	Gerador inoperacional	60			0	50	30	23,0%	464 €
8	Gerador nr 4	Gerador inoperacional	60			0	50	30	23,0%	464 €
<i>Sistemas auxiliares</i>										
9	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	70	60	9,0%	5.400 €	39	7	100,0%	1.990 €
9b	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	70	180	3,8%	1.800 €	39	7	100,0%	1.990 €
9c	Grupo ar condicionado nr 1	Grupo inoperacional	70			0 €	39	7	100,0%	1.990 €
10	Grupo ar condicionado nr 2	Grupo inoperacional	70	180	3,8%	1.800 €	39	7	100,0%	1.990 €

	Termografia				Análise de óleos				Inspeção visual				CUSTO TOTAL
	detetabilidade	periodicidade (d)	prob coincidência	CUSTO	detetabilidade	periodicidade (d)	prob coincidência	CUSTO	detetabilidade	periodicidade (d)	prob coincidência	CUSTO	
55	60	12,0%	4.200 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	7	100,0%	3.981 €	14.659,37 €	
55			0 €	40	180	3,0%	1.300 €	10	15	44,0%	1.858 €	4.086,40 €	
55	90	9,0%	2.800 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	1.858 €	7.536,40 €	
55	90	9,0%	2.800 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	1.858 €	7.536,40 €	
40	30	9,7%	8.400 €	40	120	1,8%	1.950 €	10	15	18,2%	1.858 €	28.000,80 €	
40			0 €	40	180	1,1%	1.300 €	10	30	9,5%	929 €	9.893,20 €	
40			0 €	40	180	1,8%	1.300 €	10	30	7,4%	929 €	14.422,00 €	
55	90	9,0%	1.400 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	929 €	4.743,20 €	
55	90	9,0%	1.400 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	929 €	4.743,20 €	
55	90	9,0%	1.400 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	929 €	4.743,20 €	
55	90	9,0%	1.400 €	40	120	7,0%	1.950 €	10	15	44,0%	929 €	4.743,20 €	
50	30	19,5%	4.200 €				0	10	1	100,0%	13.932 €	25.522,29 €	
			0				0	10	1	100,0%	13.932 €	17.722,29 €	
50	30	20,0%	4.200 €				0	10	1	100,0%	13.932 €	20.122,29 €	
			0				0	10	1	100,0%	13.932 €	17.722,29 €	